Digitized by Google

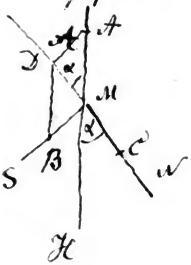
Phys. g.
145
Greiss

.1456

Digitized by Google

Anmerkung zu § 97 Seite 113.

In der Sinusbussole ist der Raum in der Richtung der Nadel, also parallel mit der Richtung der Nadel; also ist ihre wirkliche Kraft genommen in der Richtung der Nadel.



sei MN die Nadel, CH der magnetische Meridian, MA die Größe der Kraft T, womit der Erdmagnetismus auf die Nadel wirkt, MB die Größe S der Kraft S, womit der Draht auf die Nadel wirkt.

Die Mittelkraft aus beiden muss die Richtung der Nadel haben, wenn die Nadel ruhig steht. Man stelle das Parallelogramm MBDA her; der Winkel, den die Nadel MN mit dem Meridian macht, sei α; so ist ∠ DMA = α.

In dem rechtwinkligen Dreieck DMA ist

$DA = MA \cdot \sin\alpha$; oder da $DA = BM = S$,

$AM = T$ ist, so ist $S = T \cdot \sin\alpha$.

Ist s die andere Kraft, womit die Nadel in der Declinations-Winkel β ruhig, so ist

$s = T \cdot \sin\beta$; also $S : s = T \sin\alpha : T \sin\beta$

$= \sin\alpha : \sin\beta$.

Digitized by Google

Digitized by Google

Lehrbuch der Physik

für

Realanstalten und Gymnasien,

sowie

zum Selbstunterricht

von

Dr. C. B. Greiß,
Lehrer der Physik am Realgymnasium in Wiesbaden.

Mit 179 in den Text eingedruckten Holzschnitten und zwei Lithographien.

Wiesbaden.
Verlag von Christian Wilhelm Kreidel.
1853.

Bayerische Staatsbibliothek München

Digitized by Google

BIBLIOTHECA REGIA MONACENSIS

Druck von C. Adelmann in Frankfurt a. M.

Bayerische Staatsbibliothek München

Digitized by Google

Vorwort.

Um das Erscheinen dieses neuen Lehrbuchs der Physik zu rechtfertigen, mögen folgende Bemerkungen dienen, die zeigen sollen, von welchen Ansichten der Verfasser bei der Ausarbeitung desselben geleitet wurde. Er hatte sich zunächst die Aufgabe gestellt, in Vergleich zu den gebrauchtesten Schulbüchern eine Erweiterung des Stoffes in dem Maße eintreten zu lassen, daß allen Schulen ein ausreichendes Material für ihren physikalischen Unterricht geboten würde. Das Bedürfniß der in neuerer Zeit entstandenen höheren Realanstalten, der Realgymnasien, war bis jetzt noch nicht berücksichtiget worden; für sie war der in den Schulbüchern der Physik gebotene Stoff zu mager, und eins der ausführlicheren Bücher konnte dem Unterrichte auch nicht zu Grunde gelegt werden, weil diese eines Theils nicht für Schüler berechnet sind, und anderen Theils einen zu hohen Preis haben. Daß bei der Wahl des noch weiter aufzunehmenden Stoffes stets auf die Fassungskraft eines Schülers Rücksicht genommen werden mußte, versteht sich von selbst. Nun kann aber gesagt werden: wir geben zu, daß Alles, was in diesem Buche behandelt ist, bei dem Unterrichte in einer höheren Realschule zur Sprache gebracht werden muß, aber für unsere humanistischen Gymnasien und unsere gewöhnlichen Realschulen, für die das Buch ebenfalls bestimmt sein soll, ist doch des Stoffes zu Viel. Zur Erwiederung hierauf nur die Frage: Ist Alles, was diese Schulen brauchen, in dem Buche behandelt? Muß diese Frage bejaht werden, dann läßt sich zeigen, daß das getadelte Zuviel eher ein Vorzug des Buches, als ein Vorwurf für dasselbe ist. Diesen Schulen ist nämlich die Zeit für den physikalischen Unterricht in der Regel so knapp zugemessen, daß sie höchstens ausreicht, entweder einen flüchtigen Ueberblick über das Ganze zu geben, oder, was nach meiner unmaßgeblichen Meinung den

Digitized by Google

Vorzug verdient, nur ein oder das andere Kapitel gründlich vorzunehmen. Bei dem Interesse, welches die Naturwissenschaften überhaupt und die physikalische in's Besondere gewöhnlich für Jeden haben, entsteht in den Schülern der Wunsch, mehr von der Physik kennen zu lernen, als wozu ihnen die Schule Gelegenheit bietet. Sollte ihnen da nicht ein Buch erwünscht sein, das, für ihre Fassungskraft berechnet, ihnen auch über die übrigen Kapitel die gewünschte Auskunft ertheilt? Und wenn wir Lehrer unseren Schülern ein Buch empfehlen sollen, und wir haben, eine gleich gute Bearbeitung des Stoffes vorausgesetzt, die Wahl zwischen zweien, von welchen bei fast gleichem Preise das eine nur eben das Bedürfniß der Schule berücksichtiget, das andere aber auch das abhandelt, was die Schule gern noch geben möchte, wenn nicht die Beschränkung der Zeit es unmöglich machte, so sollte ich doch glauben, daß wir uns bei unserer Wahl für das letztere entscheiden würden. In Beziehung auf die Qualität des Buches muß freilich Jeder, solange nicht competente Richter sich über dieselbe ausgesprochen haben, sich sein eigenes Urtheil bilden, darüber darf der Verfasser nicht sprechen. Was aber den Preis betrifft, so ist derselbe nicht aus der Sphäre der Preise der verbreitetsten physikalischen Schulbücher herausgetreten. Es war dies freilich nur dadurch möglich, daß sowohl die Verlagshandlung, als auch der Verfasser sich zu Opfern bereit erklärten, daß man die Abbildung vieler schon aus der Beschreibung verständlicher Apparate vermied, und sich vorzugsweise auf Demonstrationsfiguren beschränkte (von Apparaten sind hauptsächlich nur solche abgebildet worden, welche eine praktische Anwendung gefunden haben), daß man ein größeres Format und compresseren Druck wählte. Trotzdem durfte jedoch die äußere Ausstattung nicht beeinträchtigt werden, und daß dies auch nicht geschehen ist, davon kann sich Jeder bei dem ersten Anblick überzeugen.

Ein zweiter wichtiger Gesichtspunkt war für den Verfasser die Methode. Die Naturwissenschaften sind Erfahrungswissenschaften. Sie können also bei dem Unterrichte naturgemäß auch nur von der Erfahrung oder dem die Stelle derselben vertretenden Experimente ausgehen, und durch Discussion derselben sich erst ihre Gesetze ableiten. In den meisten der bisher erschienenen physikalischen Bücher ist der grade entgegengesetzte Weg eingeschlagen, die Physik wird als fertige Wissenschaft vorgetragen, und die Experimente hinken als Belege der aufgestellten Gesetze hintennach. Daß ich den ersten Weg gewählt, dafür glaube ich auf die Billigung jedes verständigen Schulmannes rechnen zu dür-

Digitized by Google

fen. Wenn ferner die Schule den Schüler nicht nur mit Kenntnissen bereichern, sondern ihn auch befähigen soll, später selbstständig Studien in der Wissenschaft machen zu können, so muß zu diesem Zwecke wenigstens ein Abschnitt ausführlicher und vollständiger vorgetragen sein. Ich habe dazu den Abschnitt von dem Lichte gewählt, und auch die Kapitel über die Interferenz und Beugung, Polarisation und doppelte Brechung, die in den gewöhnlichen Schulbüchern kaum einer kurzen Erwähnung gewürdigt sind, in größerer Ausführlichkeit vorgetragen. Meine Wahl ist grade auf diese Kapitel gefallen, weil sie mir ganz besonders geeignet erscheinen, den Schüler zum Selbstexperimentiren und Beobachten anzuleiten, ihn aus seinen gemachten Beobachtungen die nöthigen Schlüsse ziehen zu lassen, und sich so selbstthätig diesen Theil der Wissenschaft aufzubauen. Außerdem lernt er an diesen Kapiteln deutlich erkennen, welche Anforderungen an eine wissenschaftliche Hypothese gemacht werden müssen, wenn sie sich allgemeine Geltung erringen will. Bemerken muß ich hier, daß die erwähnten Kapitel der Optik mit gütiger Erlaubniß des Herrn Professor Müller zu Freiburg fast ausschließlich nach dessen ausgezeichnetem Lehrbuch der Physik und Meteorologie behandelt sind, da wohl schwerlich ein anderes Buch gefunden werden dürfte, in welchem sie mit größerer Klarheit und Verständlichkeit vorgetragen wären.

Die Schule, wenigstens diejenige, welche für wissenschaftliche Studien vorbereitet, muß dem Schüler aber auch zeigen, welches wichtige Hilfsmittel ihm in der Mathematik für seine physikalischen Studien geboten ist. Dadurch wird es nöthig, einen Abschnitt auch mit mathematischer Begründung vorzutragen. Welcher Abschnitt hierzu bestimmt werde, darüber konnte die Wahl gar nicht zweifelhaft sein; an dem mechanischen Theil der Physik springt der Nutzen der Anwendung der Mathematik am unzweideutigsten in die Augen. In einem Schulbuch durften freilich nur solche Sätze aufgenommen werden, die sich schon mit Hilfe der Elementarmathematik begründen lassen. Es ist dies auch festgehalten worden, und die einzige vorkommende Ausnahme, in welcher ein elementarer Satz der Differentialrechnung in Anwendung kam (zur Bestimmung der größten Wurfhöhe beim schiefen Wurf), möge durch den Zusammenhang gerechtfertigt werden.

In Beziehung auf die Anordnung der einzelnen Abschnitte habe ich noch zu erwähnen, daß die gewohnte Reihenfolge in der Weise abgeändert wurde, daß die mechanischen Kapitel von dem Anfange ganz

Digitized by Google

an das Ende verwiesen sind. Die Ursache dieser Aenderung liegt grade in der mathematischen Behandlung derselben, durch welche diese Kapitel mit Vortheil nur in der obersten Klasse vorgetragen werden können. Zur Rechtfertigung dieser Anordnung will ich nur darauf aufmerksam machen, daß man in den übrigen Abschnitten fast ausschließlich nur die Sätze über die Zusammensetzung und Zerlegung der Kräfte aus den mechanischen Kapiteln benutzt, diese aber an der Stelle, die sie bisher inne hatten, dem Schüler doch nur experimentell vorgeführt werden konnten, was ja auch bei der neuen Anordnung leicht und ohne Zeitverlust geschehen kann. Daß der Lehrer die übrigen Abschnitte, wenn es die Umstände verlangen, auch in anderer Reihenfolge vortragen kann, brauche ich nicht erst zu bemerken. Ich selbst nehme die Wärmelehre mit Ausschluß der Sätze von der strahlenden Wärme stets vor der Lehre von dem Lichte, weil ich bei der oben angedeuteten Behandlung der letzteren Kapitel der Optik schon gereiftere Schüler haben muß.

Inwieweit ich das Richtige gewollt, und inwieweit es mir auch durchzuführen gelungen ist, darüber muß ich in Geduld das Urtheil sachverständiger Richter abwarten.

Wiesbaden im October 1852.

Dr. C. B. Greiß.

Inhalt.

Seite

Einleitung 1

Erster Abschnitt.

Von den mechanischen Eigenschaften der Körper im Allgemeinen 3
Erstes Kapitel. Von den allgemeinen Eigenschaften der Körper 3
Zweites Kapitel. Von den besonderen Eigenschaften der Körper 14
A) Eigenschaften der festen Körper 15
B) Eigenschaften tropfbar flüssiger Körper 20
C) Eigenschaften ausdehnsam flüssiger Körper 28

Zweiter Abschnitt.

Magnetismus 45

Dritter Abschnitt.

Electricität 60
Erstes Kapitel. Von der Reibungselectricität 60
Zweites Kapitel. Von der galvanischen Electricität 86
Drittes Kapitel. Von der Inductionselectricität 132
Viertes Kapitel. Von der Thermoëlectricität 143
Fünftes Kapitel. Von der atmosphärischen Electricität 147
Sechstes Kapitel. Von noch anderen Mitteln, Electricität zu erregen . . . 154

Vierter Abschnitt.

Akustik oder Lehre vom Schall 157
Erstes Kapitel. Von den tönenden Schwingungen fester Körper 158
Zweites Kapitel. Von den tönenden Schwingungen der Luft 169
Drittes Kapitel. Von den durch stehende Schwingungen erzeugten Tönen . 180
Viertes Kapitel. Von der Fortpflanzung des Schalles 185

Fünfter Abschnitt.

Lehre von dem Lichte 205
Erstes Kapitel. Von der Verbreitung des Lichts in demselben Mittel . . . 206
Zweites Kapitel. Aenderung der gradlinigen Richtung bei dem Uebergang aus einem Mittel in ein anderes durch Reflexion 212
Drittes Kapitel. Aenderung der gradlinigen Richtung bei dem Uebergang aus einem Mittel in ein anderes durch Brechung 223
Viertes Kapitel. Vom Sehen mit unbewaffnetem Auge 252
Fünftes Kapitel. Das Sehen mit bewaffnetem Auge 263
Sechstes Kapitel. Von der Interferenz und Beugung des Lichts 273
Siebentes Kapitel. Polarisation des Lichtes 292
Achtes Kapitel. Doppelte Brechung des Lichtes 297

Digitized by Google

Seite

Neuntes Kapitel. Farben doppeltbrechender Kryſtallplatten im polariſirten Lichte 307
Zehntes Kapitel. Circularpolariſation 318

Sechſter Abſchnitt.

Von der Wärme 326
Erſtes Kapitel. Von der Ausdehnung durch die Wärme 327
Zweites Kapitel. Von der Aenderung des Aggregatzuſtandes durch die Wärme 341
Drittes Kapitel. Von der Wirkung der Wärme auf ausdehnſame Flüſſigkeiten 353
Viertes Kapitel. Von dem Meſſen der Wärmemengen, welche zur Erzielung beſtimmter Wirkungen erfordert werden 372
Fünftes Kapitel. Von der Fortpflanzung der Wärme 383
A) Von der Fortpflanzung der Wärme durch Leitung 384
B) Von der Fortpflanzung der Wärme durch Strahlung 389
Sechſtes Kapitel. Von den verſchiedenen Quellen der Wärme 402
Siebentes Kapitel. Von den durch die Wärme bedingten atmoſphäriſchen Erſcheinungen 411

Siebenter Abſchnitt.

Mechanik 427
Erſtes Kapitel. Statik 429
A) Zuſammenſetzung und Zerlegung der Kräfte 429
B) Von dem Schwerpunkte feſter Körper 438
C) Gleichgewicht der Kräfte an Maſchinen 445
Zweites Kapitel. Dynamik 460
A) Von der gradlinigen gleichförmigen Bewegung 460
B) Von der gradlinigen veränderlichen Bewegung 462
C) Von dem Stoße der Körper 471
D) Von der krummlinigen Bewegung 476
E) Von den Hinderniſſen der Bewegung 494
Drittes Kapitel. Hydroſtatik 497
A) Allgemeine Geſetze des Gleichgewichts tropfbarer Flüſſigkeiten ohne Rückſicht auf die Kräfte, welche auf dieſelben wirken 499
B) Geſetze des Gleichgewichts ſchwerer tropfbarer Körper ohne Rückſicht auf Molecularkräfte 501
C) Geſetze des Gleichgewichts ſchwerer tropfbarer Körper mit Rückſicht auf die Molecularkräfte 512
Viertes Kapitel. Hydraulik oder Hydrodynamik 517
A) Fortſchreitende Bewegung 517
B) Wellenbewegung 531
Fünftes Kapitel. Aeroſtatik 535
Sechſtes Kapitel. Aërodynamik oder Pneumatik 547

Digitized by Google

Einleitung.

§. 1. **Was ist Physik?** Die Naturkunde, als der Inbegriff aller Naturwissenschaften, beschäftigt sich mit der Kenntniß der durch unsere Sinne wahrnehmbaren Dinge. Unter dem Worte Natur versteht man nämlich in dieser Beziehung, abgesehen von anderen Bedeutungen, in welchen das Wort noch gebraucht wird, die Gesammtheit alles Sinnlichwahrnehmbaren, die Sinnenwelt. Schon aus dem angegebenen ungeheuren Umfange des Gegenstandes der Naturkunde geht die Nothwendigkeit hervor, sie in einzelne Wissenschaften zerfallen zu lassen. Während sich die beschreibenden Naturwissenschaften (Zoologie, Botanik, Mineralogie) die Kenntniß der Naturdinge nach ihrer Aehnlichkeit, die Auffindung ihrer übereinstimmenden Merkmale zur Aufgabe setzen, hat ein zweiter Haupttheil, die Naturlehre, die Erscheinungen und Veränderungen, welche die Naturdinge durch gegenseitige Einwirkung erleiden, die Gesetze, nach welchen dieselben erfolgen, und die Ursachen, durch welche sie hervorgebracht werden, zu seinem Gegenstande. Aber auch dieses Feld ist noch zu groß. Man scheidet daher die Kenntniß aller derjenigen Erscheinungen und Veränderungen, welche mit der Lebensthätigkeit der organischen Wesen zusammenhängen, oder durch dieselbe bedingt sind, als eigene Wissenschaft, die Physiologie (Thier- und Pflanzenphysiologie), aus. Den Rest hat man abermals trennen zu müssen geglaubt, und man hat der Chemie denjenigen Theil zugewiesen, welcher von den Veränderungen der inneren materiellen Beschaffenheit der Naturdinge handelt. Was dann noch von der Naturlehre übrig bleibt, ist das Gebiet der Physik. Die Physik ist also diejenige Wissenschaft, welche sich die Bestimmung und Erklärung der Erscheinungen und Veränderungen der Naturdinge, insofern sie nicht durch die Lebensthätigkeit bedingt sind, oder sich nicht auf die innere materielle Beschaffenheit erstrecken, zur Aufgabe setzt. Die Physik nennt man auch wohl mechanische Naturlehre, weil ihr in der gegebenen Beschränkung hauptsächlich die Betrachtung der räumlichen Veränderungen geblieben ist.

§. 2. **Beobachtung, Versuch, physikalischer Apparat.** Es entsteht nun zunächst die Frage, wie sich der Physiker das Material beschafft, das ihn befähigt, die ihm gestellte Aufgabe zu lösen. Da er uns zunächst Erscheinungen und Veränderungen, welche sich in der Sinnenwelt zutragen, kennen lehren soll, so ist er natürlich an die sinnliche Wahrnehmung oder die Erfahrung als die Hauptquelle gewiesen, aus welcher er sein Material zu schöpfen hat. Sie ist für ihn eine zweifache. Entweder beschränkt er sich auf eine aufmerksame Betrachtung der Erscheinungen, welche sich an den Naturdingen ohne unser Zuthun ereignen, oder er versetzt selbst die letzteren in bestimmte Umstände, damit irgend eine Erscheinung erfolge. Im ersteren

Digitized by Google

Falle sagt man, er mache Beobachtungen, im letzteren Versuche oder Experimente. Bei der Beobachtung treten die Erscheinungen nur unter gegebenen Umständen auf, bei den Versuchen hat es der Physiker in seiner Gewalt, diese Umstände auf mannichfaltige Weise abzuändern. Wenn demnach die Beobachtung auch das Ursprüngliche ist, und uns die Natur in ihrer ungehinderten Wirksamkeit zeigt, so muß sie für ihn doch erst durch den Versuch ergänzt werden. Zu beiden bedarf er Werkzeuge und Geräthschaften, welche dann wegen ihres besonderen Gebrauchs physikalische Instrumente oder Apparate genannt werden. Bei den Beobachtungen sollen sie ihm das Feld der sinnlichen Wahrnehmung vergrößern, bei den Versuchen dagegen ihm die Mittel an die Hand geben, um die zum Eintritt einer Erscheinung erforderlichen Umstände hervorzurufen.

§. 3. **Naturgesetz.** Nachdem der Physiker sich auf die im vorigen Paragraphen angegebene Weise sein Material zusammengetragen hat, muß der zweite Theil seiner Thätigkeit eintreten, er muß das gesammelte Material verarbeiten. Er sucht nun das einer Reihe von Erscheinungen Gemeinsame auf, und stellt sie in Rücksicht hierauf zusammen. Dann forscht er darnach, ob sich für das Auftreten einer solchen Gruppe von Erscheinungen die gleichen Bedingungen auffinden lassen. Ist ihm dies gelungen, dann schließt er, daß eine Regel, welche sich in vielen einzelnen, willkürlich gewählten Fällen bewährt hat, allgemeine Gültigkeit haben müsse. Auf diese Weise gelangt er zur Kenntniß der Naturgesetze, d. h. der Sätze, welche aussagen, was für ein Erfolg unter bestimmten Umständen eintreten müsse. Er hat demnach eine Naturerscheinung erklärt, wenn er im Stande ist, sie auf ein allgemeines Naturgesetz zurückzuführen.

§. 4. **Naturkraft, Hypothese.** Kennt nun auch der Physiker die Naturgesetze, weiß er, in welcher Weise unter gegebenen Bedingungen eine Erscheinung eintreten muß, so ist er doch noch nicht zu dem Ziele seiner Forschung gelangt, von ihm wird auch noch die Ableitung der Erscheinungen aus ihren Ursachen gefordert. Hier schließen wir nun, daß ähnliche Erscheinungen auch Wirkungen ähnlicher Ursachen sein müssen. Bei der Erforschung der Ursachen, welche den Erscheinungen zu Grunde liegen, findet man häufig, daß die nächste Ursache selbst wieder eine Erscheinung, also die Wirkung einer anderen Ursache ist, die nun zunächst aufgesucht werden muß. Auf diesem Wege gelangen wir zuletzt zu einer Erscheinung, für welche kein sinnlich wahrnehmbarer Grund mehr aufgefunden werden kann. Da indessen auch diese letzte Erscheinung eine Ursache haben muß, wenn sich dieselbe gleich unserer sinnlichen Wahrnehmung entzieht, so bezeichnen wir diese Ursache mit dem Worte Naturkraft oder Grundkraft. Die Frage, worin das Wesen einer Naturkraft bestehe, können wir demnach nicht beantworten, wir lernen nur die Art ihrer Thätigkeit, ihre Wirkungen kennen. Nach der Verschiedenheit dieser Wirkungen unterscheidet man dann verschiedene Naturkräfte; so spricht man von einer Anziehungskraft, Abstoßungskraft u. s. w. Grade weil der Physiker über die inneren Ursachen der Erscheinungen, über das Wesen der Kräfte keine Gewißheit erlangen kann, ist er oft genöthigt, zur Erklärung der Erscheinungen zu Vermuthungen oder Hypothesen seine Zuflucht zu nehmen. Eine solche Hypothese hat einen um so größeren wissenschaftlichen Werth, je einfacher die Voraussetzungen sind, unter welchen sie Zusammenhang in eine ganze Reihe

Digitized by Google

mannichfaltiger Erscheinungen bringt, und je größer die Anzahl der Erscheinungen ist, welche sich durch dieselbe erklären lassen, je mehr sie durch neugemachte Beobachtungen Bestätigung findet, und je größer die Analogie ist, welche sie mit als richtig anerkannten Wahrheiten besitzt. Sie fällt dagegen zusammen, sobald nur eine einzige Erfahrung gemacht wird, welche mit ihr in Widerspruch tritt. Manche Hypothese hat schon im Laufe der Zeit die Natur einer festbegründeten physikalischen Wahrheit angenommen.

Erster Abschnitt.

Von den mechanischen Eigenschaften der Körper im Allgemeinen.

Erstes Kapitel.

Von den allgemeinen Eigenschaften der Körper.

§. 5. **Ausdehnung.** Jedes Naturding, welches wir mit unseren Sinnen wahrnehmen können, heißt ein Körper. Schon daraus, daß wir die Körper mit unseren Sinnen wahrnehmen, folgt, da wir an Raum und Zeit gebunden sind, mit Nothwendigkeit, daß sie im Raume vorhanden sein müssen, daß sie also selbst einen Raum einnehmen. Diese Eigenschaft der Körper könnte füglich Räumlichkeit heißen, heißt aber gewöhnlich Ausdehnung. Da wir einen Körper ohne Beziehung auf den Raum gar nicht denken können, so ist die Ausdehnung nicht nur eine allgemeine, d. h. allen Körpern gemeinschaftliche, sondern sie ist selbst eine zum Wesen des Körpers nothwendige Eigenschaft. Aber zur sinnlichen Wahrnehmbarkeit gehört nicht bloß, daß der Körper einen Raum einnehme, sondern auch, daß er diesen Raum mit Etwas ausfülle. Dieses Etwas nennen wir Materie oder Stoff, so daß sich also ein Körper auch als Materie mit begrenzter Ausdehnung erklären ließe. Ein physischer Körper darf demnach nicht mit einem geometrischen verwechselt werden, da man bekanntlich die Vorstellung von letzterem nur dadurch erhält, daß man aus seinem begrenzten Raume alle Materie hinwegdenkt. Die Größe des Raumes, welchen ein Körper einnimmt, nennt man sein Volumen (Rauminhalt, körperlicher Inhalt); die Art der Begrenzung dieses Raumes bedingt die Gestalt oder Figur des Körpers. Wie das Volumen eines Körpers gefunden und ausgemessen wird, lehrt die Geometrie, und es sollen hier nur die gewöhnlichen Maßstäbe, deren man sich zu diesem Behufe bedient, und ihr gegenseitiges Verhältniß zu einander angeführt werden. Da die Geometrie, um einen begrenzten Raum messen zu können, auch die ihn begrenzenden Flächen, und die diese begrenzenden Linien messen muß, und da man nur Gleichartiges mit einander vergleichen kann, das Messen aber seinem Wesen nach nur ein Vergleichen ist, so folgt daraus, daß es dreierlei Arten von Maßstäben geben müsse, je nachdem Linien oder Flächen oder Körperräume gemessen werden sollen. Von jeder Art hat man wieder zur größeren Bequemlichkeit der Größe nach verschiedene Maßstäbe, da es nicht zweck-

Digitized by Google

dienlich sein würde, sehr Großes mit Kleinem und umgekehrt zu vergleichen. Bei wissenschaftlichen Untersuchungen wird jetzt vorzugsweise das neufranzösische Metermaß angewandt, und zwar deßwegen, weil die Basis desselben, das Meter (τὸ μέτρον, das Maß) stets wieder mit der größten Genauigkeit bestimmt werden kann (das Meter ist der 10,000,000ste Theil des nördlichen Meridianquadranten der Erde), und weil es durch seine Decimaleintheilung zur Rechnung äußerst bequem ist. Auch empfiehlt es sich durch die Anordnung, daß die Namen für die Unterabtheilungen der Haupteinheit mit den entsprechenden lateinischen, und für die Oberabtheilungen mit den entsprechenden griechischen Zahlwörtern zusammengesetzt werden. Zur Messung der Längen (Linien) ist die Haupteinheit das Meter = 10 Decimeter = 100 Centimeter = 1000 Millimeter. 10 Meter sind = 1 Decameter, 10 Decameter = 1 Hectometer, 10 Hectometer = 1 Kilometer, 10 Kilometer = 1 Myriameter. Zur Messung der Flächen dienen Quadratflächen, deren Seiten einer der genannten Längeneinheiten gleich sind, also das Quadratmeter, Quadratdecimeter, Quadratcentimeter u. s. f. Auf eine Einheit der höheren Ordnung gehen hier 100 Einheiten der nächst niedrigeren. Statt Quadratdecameter sagt man beim Ländermaß Are, so daß also die Are = 100 Quadratmeter. Eine Hectare ist dann natürlich = 100 Aren = 10,000 Quadratmeter. Als Körpermaße dienen Würfel, von denen jede Kante gleich einer der obigen Längeneinheiten ist, also das Cubikmeter, Cubikdecimeter u. s. f. Hier ist jede Einheit einer höheren Ordnung = 1000 Einheiten der nächst niedrigeren. Statt Cubikmeter sagt man auch Stere, und statt Cubikdecimeter Liter. Außerdem sind noch im Gebrauche: 1) das altfranzösische Maß, dessen Grundeinheit der Pariser Fuß = 12 Par. Zoll = 144 Par. Linien ist. Auf das Meter reducirt machen 3,078444 Par. Fuß ein Meter. 2) Der rheinländische oder preußische Fuß, der sich ebenfalls in 12 Zoll oder 144 Linien abtheilt, und von welchem 3,186199 = 1 Meter sind. Bei den in Baden und Nassau neu eingeführten Maßen hat man sich dem Metermaß insofern zu nähern gesucht, als in beiden Ländern der Fuß genau zu 3 Decimeter angenommen wurde. Als größere Längeneinheit muß auch noch die geographische Meile erwähnt werden, welche = 7420,158 Meter = 23642,1 rheinl. Fuß ist, und von welchen 15 einen Grad des Aequators ausmachen.

§. 6. **Undurchdringlichkeit.** 1) Wirft man in ein Gefäß mit Wasser einen Stein, so sehen wir das Wasser in dem Gefäße zu einer größeren Höhe aufsteigen. 2) In einen am einen Ende verschlossenen Cylinder passe ein genau anschließender Kolben. Wenn man es versucht, den Kolben in den Cylinder niederzudrücken, so wird es nie gelingen, ihn ganz bis auf den Boden desselben zu bewegen. 3) Beim Füllen enghalsiger Flaschen mit einer Flüssigkeit geht es selten ohne ein Verschütten der Flüssigkeit ab. 4) Wenn ein Trichter genau in den Hals einer Flasche paßt, und man gießt auf den Trichter soviel Flüssigkeit auf einmal, daß die Trichterröhre bedeckt wird, so füllt sich die Flasche nicht. 5) Wenn man ein umgekehrtes Trinkglas so auf eine Wasserfläche setzt, daß es mit allen Punkten seines Randes die Wasseroberfläche zu gleicher Zeit berührt, und man drückt dann das Glas unter das Wasser, so wird man nie das Glas sich ganz mit Wasser füllen sehen. 6) In den Gußformen bringt man Oeffnungen an, weil sonst der Guß nicht gelingt.

Digitized by Google

Alle diese Erscheinungen erklären sich vollständig durch die Annahme, daß nicht zwei Körper zu gleicher Zeit einen und denselben Raum einnehmen können. Im ersten Versuch verdrängt der Stein einen Theil des Wassers aus seinem Raume, dieses sucht auszuweichen, wegen der sperrenden Wände des Gefäßes kann dies aber nur so geschehen, daß sich das Wasser in dem Gefäße erhebt. In den andern angeführten Fällen kann die Luft den in ihren Raum eindringen wollenden Körpern nicht ausweichen, und setzt ihnen daher einen Widerstand entgegen. Daß dies sich aber nicht bloß bei Wasser und Luft, sondern auch bei allen übrigen Körpern so verhalte, davon können wir uns durch unseren Tastsinn vollkommen überzeugen. Denn wenn irgend ein Theil unseres Körpers in einen von einem anderen Körper schon eingenommenen Raum eindringen will, so empfinden wir stets einen Widerstand. Die allen Körpern zukommende, also allgemeine Eigenschaft, daß nicht zwei Körper zu gleicher Zeit in demselben Raume sein können, nennt man die Undurchdringlichkeit oder Impenetrabilität. Da ohne dieselbe ein physischer Körper gar nicht gedacht werden kann, so muß auch die Undurchdringlichkeit als eine nothwendige Eigenschaft der Körper angesehen werden. Einem geometrischen Körper kommt sie nicht zu, weil ihm ja grade das Erfülltsein mit Materie mangelt. Daß das Wort Undurchdringlichkeit hier nicht nach dem Sprachgebrauch des gewöhnlichen Lebens zu verstehen sei, nach welchem man wohl sagen kann „die Tinte dringt in das Löschpapier ein“ oder „wir durchdringen die Luft oder das Wasser“, bedarf wohl keiner weiteren Erwähnung.

Erwägt man bei dem ersten Versuch, daß nur so viel Wasser in die Höhe steigen kann, als durch den Stein aus seiner Stelle vertrieben wurde, und daß das Volumen des vertriebenen Wassers dem Volumen des Steins genau gleich sein muß, so haben wir in diesem Versuch ein Mittel, das Volumen auch unregelmäßig gestalteter Körper auf eine einfache Weise zu ermitteln. Man wird dann zu dem Versuche am besten ein cylindrisches, genau eingetheiltes Gefäß anwenden. Ehe man den Körper hinein wirft, wird man sich genau merken, bis zu welchem Theilstriche das Wasser steht, und dann auch wieder, wie hoch es steht, nachdem der Körper hinein versenkt wurde. Auf diese Weise erhalten wir statt des unregelmäßigen Volumens ein cylinderförmiges, das ihm vollkommen gleich ist, und sich, wie die Geometrie lehrt, leicht berechnen läßt.

Der fünfte Versuch, in großartigem Maßstabe ausgeführt, gibt uns eine Vorstellung von der Taucherglocke.

§. 7. **Porosität.** 1) Im Schwamme, Korkholz, Bimsstein und vielen anderen Körpern sehen wir Löcher. 2) Bei vielen anderen Körpern, an welchen wir sie mit unbewaffnetem Auge nicht wahrnehmen, sehen wir sie mit Hilfe der Vergrößerungsgläser oder unter dem Mikroskope. 3) Quecksilber läßt sich bei Anwendung eines starken Druckes durch Holz und durch Leder pressen. 4) Wenn Wasser erwärmt wird, steigen Luftblasen aus demselben auf. 5) Wird Salz in Wasser aufgelöst, so wird dadurch das Volumen des Wassers nicht vergrößert. 6) Ueberstreicht man Holz oder Steine mit Oel, so zieht es sich in das Innere derselben. 7) Aus der Haut der Menschen und Thiere tritt Schweiß aus; Salben, mit welchen man die Haut bestreicht, wirken auf innere Theile ein.

Die Erscheinungen, welche von 3 bis 7 aufgeführt sind, erklären sich

Digitized by Google

alle, wenn man auch bei den dort erwähnten Körpern annimmt, daß sich in ihrer Materie ähnliche Zwischenräume finden, wie wir sie bei den in 1 und 2 genannten Körpern sehen. Solche Zwischenräume nennt man Poren (πόρος, Loch) und die Eigenschaft, daß die Körper das Volumen, welches wir ihnen zuschreiben, nicht vollständig mit ihrer Materie ausfüllen, die Porosität. Die Porosität wird auch für eine allgemeine Eigenschaft gehalten, da man Poren schon bei den verschiedenartigsten Körpern gefunden hat, und da man bei anderen Körpern, bei welchen sie nicht direct nachgewiesen sind, wenigstens das Volumen derselben verkleinern kann, was bei der Undurchdringlichkeit der Materie ohne die Annahme von Poren nicht möglich wäre.

Die Summe aller materiellen Theilchen eines Körpers bildet seine Masse, und diese ist demnach desto größer, je geringer die Anzahl seiner Poren ist, oder je kleiner dieselben sind. Durch Vergleichung der Masse eines Körpers mit seinem Volumen entsteht der Begriff der Dichtigkeit, so daß von zwei Körpern derjenige der dichtere ist, welcher bei gleichem Volumen eine größere Masse, oder bei gleicher Masse das kleinste Volumen hat. Gäbe es einen Körper, welcher gar keine Poren hätte, so hätte ein solcher in einem gegebenen Volumen offenbar die größtmöglichste Anzahl materieller Theile, die größte Masse, und könnte als absolut dichter Körper angesehen werden.

§. 8. **Theilbarkeit.** 1) Die allgemeine Erfahrung lehrt, daß durch verschiedene mechanische Mittel, wie z. B. durch Sägen, Feilen, Zerschlagen, Zerstoßen, Zerreiben u. s. w. die Körper in Theile zerlegt werden können. 2) Bei einigen Körpern, namentlich bei mehreren Metallen, wie Gold, Platin, Silber, ist die Theilung schon sehr weit getrieben worden. So kann man mit dem Golde eines Dukaten die Oberfläche eines Reiters sammt seinem Pferde mit einer ununterbrochenen Schicht Goldes überziehen. Wollaston hat die Anfertigung eines Platindrahtes gelehrt, von welchem ein Pfund eine Länge von mehr als 1000 deutschen Meilen hat. Silber läßt sich zu Plättchen ausdehnen, von welchen acht Millionen auf einander gelegt erst eine Dicke von $1\frac{1}{4}$ Linien haben. 3) Ein Gran Karmin färbt 20 Pfund Wasser merklich roth. Nun muß man aber, sobald die ganze Wassermasse gleichmäßig gefärbt erscheint, annehmen, daß in jedem einzelnen Tropfen Karmintheilchen vorhanden sind; denn wäre nur ein einziger Tropfen, mit welchem kein Karmin sich verbunden hätte, so müßte dieser von uns an seiner Farblosigkeit erkannt werden. Dem Karmin ähnlich verhält sich der Indigo und andere färbende Substanzen. 4) Wenn ein kleines Stückchen Moschus in einem Zimmer aufbewahrt wird, so gibt sich dieser lange Zeit hindurch an jeder Stelle des Zimmers durch den ihm eigenthümlichen Geruch zu erkennen. Es wäre auch dieses offenbar nicht möglich, wenn sich nicht mit allen Lufttheilchen des Zimmers Theilchen von der riechenden Substanz des Moschus verbunden hätten, die nur auf diese Weise auf unser Geruchsorgan einwirken können. Wie unendlich fein diese Theilchen sein müssen, geht daraus hervor, daß selbst nach längerer Zeit, in welcher doch fortwährend Luftwechsel stattgefunden hat, und in welcher alle neu hinzugekommene Lufttheilchen doch immer wieder den Moschusgeruch verrathen, an dem Moschus selbst kein Gewichtsverlust von uns beobachtet werden kann. Auch andere Riechstoffe zeigen ähnliche Erscheinungen; so soll

Digitized by Google

der Geruch des an den Küſten der Provence wachſenden Rosmarins ſich 20 bis 30 Meilen weit über die See verbreiten. 5) In ſumpfigem Waſſer lebt eine ungeheure Menge kleiner Thierchen, die ſ. g. Infuſionsthierchen, die wir mit unbewaffnetem Auge gar nicht wahrnehmen können. Unter dem Mikroſcope aber ſehen wir ſie leben und ſich bewegen. Sie müſſen demnach Organe der Ernährung und Organe der Bewegung haben, alſo auch aus verſchiedenen Theilen zuſammengeſetzt ſein, und doch ſollen von manchen von ihnen 50,000 Millionen auf einen Cubikzoll gehen.

Alle dieſe Erfahrungen berechtigen uns doch wohl zu dem Schluſſe, daß auch alle Körper theilbar ſeien. Daß die gewonnenen Theile als ſelbſtſtändige Körper ſelbſt wieder theilbar ſeien, iſt klar; aber es entſteht die Frage, wie weit auf dieſe Weiſe die Theilbarkeit getrieben werden könne. Bei unſeren Bemühungen findet ſie ihre Grenze in der Unvollkommenheit unſerer Werkzeuge und Sinne. Aber auch abgeſehen hiervon kann ſie doch nicht bis in das Unendliche fortgehen, denn ſonſt würde ſie ja zu Untheilchen führen, welche gar keine Ausdehnung mehr hätten. Daß aber durch eine Verbindung ſolcher kein ausgedehnter Körper entſtehen könne, leuchtet ein. Deßwegen hat auch jetzt die Anſicht, nach welcher alle Körper aus unendlich kleinen, nicht weiter zerlegbaren, alſo untheilbaren Theilchen, denen man den Namen Atome (ἄτομος, untheilbar) beigelegt hat, beſtehen, faſt allgemeine Geltung gewonnen; ſie heißt die atomiſtiſche Theorie. Von den Atomen müſſen die Molecüle oder Maſſentheilchen unterſchieden werden, in welchen ſchon Atome gemengt ſind, wenn ſie ſich gleich durch die Kleinheit ihrer Ausdehnung unſerer ſinnlichen Wahrnehmung entziehen.

§. 9. **Beweglichkeit; Trägheit oder Beharrungsvermögen.** 1) Die Erfahrung lehrt, daß ein Körper durchaus nicht den Raum, welchen er einmal eingenommen hat, auch unverändert beibehalten muß, ſondern daß er den Ort, in welchem er ſich befindet, verlaſſen und in andere Orte übergehen könne. 2) Um einen ſchwer beladenen Güterwagen in Bewegung zu verſetzen, iſt eine größere Anſtrengung der Pferde nöthig, als ihn dann in Bewegung zu erhalten. 3) Wenn wir uns in einem Fahrzeuge befinden (z. B. in einem Wagen oder einem Kahne), das plötzlich in Bewegung geſetzt wird, ſo ſchwanken wir mit unſerem Oberkörper nach Hinten. 4) Legt man auf ein Glas ein Kartenblatt, und auf das Kartenblatt eine Geldmünze, und ſchleudert nun das Kartenblatt durch einen raſch gegen daſſelbe geführten Schlag in horizontaler Richtung fort, ſo fällt die Geldmünze in das Glas. 5) Ziehen wir eine Schüſſel voll Waſſer ſchnell nach einer Seite hin, ſo fließt das Waſſer auf der entgegengeſetzten Seite zum Theil heraus. 6) Man befeſtigt bekanntlich Hämmer und Beile, welche nicht mehr feſt auf ihren Stielen ſitzen, dadurch wieder auf denſelben, daß man mit dem unteren Ende des Stiels einige Male auf einen harten Körper ſtößt. 7) Wenn von Mühlrädern das ſie treibende Waſſer abgehalten wird, ſo bewegen ſie ſich doch noch eine Zeit lang fort; ebenſo die Schwungräder an Maſchinen, wann die bewegende Kraft zu wirken aufhört. 8) Reiter werden öfter abgeworfen, wenn das Pferd bei raſcher Bewegung plötzlich ſtehen bleibt. 9) Die Himmelskörper ſehen wir in fortdauernder, ununterbrochener Bewegung begriffen. 10) Wenn aus einem Maſtkorbe eines ſchnell ſegelnden Schiffes ein Stein herabfällt, ſo fällt er doch, ungeachtet das Schiff ſich

Digitized by Google

während der Zeit seines Fallens fortbewegt hat, neben dem Maste nieder. Ebenso sind Kunstreiter im Stande, im schnellsten Gallop in die Höhe geworfene Kugeln wieder zu fangen. 11) Bei schnellem Laufen fällt es immer schwer, plötzlich still zu stehen. 12) Kommt man bei dem Schreiben mit der Feder auf eine Unebenheit des Papiers, wodurch die Feder aufgehalten wird, so spritzt die Tinte vorwärts.

Aus 1 erhellt, daß den Körpern auch die Eigenschaft der Beweglichkeit zugesprochen werden müsse. Nun kann aber in der Natur gar keine Veränderung in dem Zustande der Körper vorgehen, die nicht von einer bestimmten Ursache veranlaßt wird. Ein Körper mag also ruhen oder sich bewegen, so ist immer eine Kraft nöthig, um ihn aus dem einen Zustande in den anderen überzuführen. Wir können uns aber unmöglich diese Kraft als der Materie des Körpers innewohnend vorstellen, da das Wesen der Materie in dem Raumerfüllen begründet ist. Der Körper leistet demnach der Einwirkung einer solchen Kraft einen gewissen Widerstand, welcher von der Kraft erst bewältigt werden muß, wenn der Körper den Zustand, in welchem er sich grade befindet, sei es der der Ruhe oder der Bewegung, verändern soll. Die Unfähigkeit eines Körpers nun, seinen Zustand der Bewegung oder der Ruhe durch sich selbst zu ändern, heißt Trägheit. Weil es der Sache nach sich ganz gleich bleibt, wenn man sich vorstellt, jeder Körper habe das Bestreben, in dem Zustande, in welchem er sich gerade befindet, zu beharren, so nennt man diese Eigenschaft auch wohl das Beharrungsvermögen, wenngleich dieses Wort die Sache nicht ganz richtig bezeichnet, da ja ein Körper, wenn er nur das Vermögen der Beharrung hätte, doch auch seinen Zustand selbstthätig müßte ändern können. Die Erfahrungen in 2 bis 6 zeigen das Beharrungsvermögen für den Zustand der Ruhe, die übrigen für den Zustand der Bewegung. In 2 sehen wir deutlich, daß ein Körper der auf ihn einwirkenden Kraft, welche seinen Zustand verändern will, einen Widerstand entgegensetzt; aus 3 bis 6 lernen wir noch außerdem, daß für einen Körper zur Annahme eines neuen Zustandes eine gewisse, wenn auch bisweilen nur unmerklich kleine Zeit erfordert wird. Daß ein bewegter Körper auch dauernd in Bewegung bleibt, sehen wir deutlich nur aus 9, während wir in den übrigen Fällen, nachdem die bewegende Kraft aufgehört hat einzuwirken, den Körper schnell zur Ruhe kommen sehen. In diesen Fällen ist es nämlich der Widerstand des Mittels, in welchem die Bewegung erfolgt, sowie die Reibung, welche dem Körper fortwährend einen Theil seiner Geschwindigkeit entziehen, wodurch sie natürlich nach und nach ganz vernichtet wird, während sich der Bewegung der Himmelskörper keine solchen merklichen Hindernisse entgegenstellen. Die willkürlichen Bewegungen der Menschen und Thiere können nicht als Einwand gegen das Beharrungsvermögen als eine allgemeine Eigenschaft angesehen werden, denn, wenn auch hier die Ursache der Bewegung nicht außerhalb des Thier- und Menschenkörpers gefunden werden kann, so muß sie doch wenigstens von der Materie desselben getrennt gedacht, und in der Willenskraft gesucht werden. Einer näheren Erläuterung bedürfen nun nur noch die beiden in 10 aufgeführten Erfahrungen. Der Stein theilte, so lange er im Mastkorbe war, und die Bälle, so lange sie sich in der Hand des Kunstreiters befanden, die Bewegung des Schiffes und des Reiters, und behalten auch diese

Digitized by Google

Bewegung, der Stein während des Fallens und die Bälle während des Wurfes, bei.

§. 10. **Zusammendrückbarkeit und Ausdehnbarkeit.** Schon in §. 7 wurde, um die Allgemeinheit der Porosität nachzuweisen, behauptet, das Volumen der Körper lasse sich nach der Erfahrung verkleinern. Es möge daher diese Behauptung hier an einzelnen speciellen Fällen nachgewiesen werden: 1) Ein Schwamm läßt sich bis auf $\frac{1}{4}$ oder $\frac{1}{5}$ seines Volumens zusammenpressen. 2) Von neugebauten Häusern hört man oft nach einiger Zeit sagen „sie haben sich gesetzt," wenn nämlich die Fundamente durch die darüber errichtete Last etwas zusammengedrückt sind. 3) Münzen und Medaillen lassen sich in Thon, Wachs, Gyps u. s. f. abdrücken. 4) Selbst die dichtesten Körper, die edeln Metalle, werden bei dem Prägen der Münzen in ihrem Volumen verkleinert. 5) Durch den von Oersted erfundenen Wassercompressionsapparat oder Piezometer (πιέζειν drücken und μέτρον Maß) kann das Volumen einer bestimmten Quantität Wasser oder einer anderen Flüssigkeit durch Anwendung eines großen Druckes, wenn auch nur um Weniges, vermindert werden. 6) Durch den zweiten Versuch in §. 6 ist bereits gezeigt, daß das Volumen einer eingeschlossenen Luftmasse sich sehr bedeutend verkleinern läßt.

Aber die Erfahrung lehrt auch auf der anderen Seite, daß das Volumen eines Körpers unter gegebenen Umständen vergrößert werden könne, und auch hiervon sollen einzelne Beispiele angeführt werden. 1) Wenn in dem oben erwähnten zweiten Versuche in §. 6 der Druck auf den Kolben aufhört, so wird der Kolben wieder theilweise in die Höhe getrieben. 2) Ein Bleidraht kann schon durch einen Zug mit der Hand verlängert werden, wobei er, trotz der gleichzeitigen Abnahme seiner Dicke, doch ein größeres Volumen erhält. 3) Später wird noch gezeigt, daß alle Körper durch Einwirkung der Wärme ausgedehnt werden, und bei Abnahme derselben sich wieder zusammenziehen.

Wir haben aus dem Gesagten wieder zwei neue, allen Körpern gemeinschaftliche Eigenschaften kennen gelernt, nämlich die Zusammendrückbarkeit oder Compressibilität (comprimere, zusammendrücken) d. i. die Eigenschaft der Körper, einen kleineren Raum einnehmen zu können, und die Ausdehnbarkeit oder Expansibilität (expandere, ausbreiten), d. i. die Eigenschaft, einen größeren Raum einnehmen zu können. Die Porosität und die Zusammendrückbarkeit haben Veranlassung gegeben, daß man in der atomistischen Theorie annimmt, die Atome seien durch Zwischenräume von einander getrennt. Wenn nun dessenungeachtet ein Aggregat von Atomen als ein Körper von bestimmter Form auftreten soll, so muß eine Ursache da sein, welche ein Zusammenhalten derselben vermittelt. Man nimmt daher eine den Atomen innewohnende Kraft an, welche dieselben einander zu nähern suche, eine Anziehungskraft. Würde diese aber allein wirksam sein, so müßten ja die Atome endlich zu gegenseitiger Vereinigung geführt werden, was doch wegen der Porosität und der Zusammendrückbarkeit nicht angenommen werden darf. Es muß also auch noch eine zweite Kraft vorhanden sein, welche der ersteren entgegenwirkt, eine abstoßende Kraft. Um sich das Vorhandensein einer solchen Kraft gleichzeitig mit der gegenseitigen Anziehung der Atome erklären zu können, nimmt man an, daß eine äußerst feine und elastische Materie, deren man auch, wie später gezeigt werden wird,

Digitized by Google

zur Erklärung der Erscheinungen des Lichts und der Wärme bedarf, und von welcher man voraussetzen muß, daß sie in dem ganzen Weltenraume verbreitet sei, der Aether, um jedes Atom eine Hülle bilde. Wenn nun zwei benachbarte Atome sich nähern, so muß die zwischen beiden befindliche Aetherhülle zusammengedrückt werden. Da sie aber elastisch ist, so wächst dadurch ihr Bestreben, sich auszudehnen, und so hält sie eine weitere Annäherung der Atome zurück. Beide unter den Atomen wirksamen Kräfte, sowohl die anziehende, als die abstoßende, umfaßt man unter dem gemeinschaftlichen Namen der Molecularkräfte.

§. 11. **Schwere; Gewicht, absolutes und specifisches.** 1) Wenn man einen Körper, z. B. einen Stein, vom Boden entfernt, und dann sich selbst überläßt, so fällt er und zwar so lange, bis er auf den Boden oder einen anderen Körper, der ihn aufhält, trifft. 2) Alle Körper üben, nach der Erfahrung, einen größeren oder kleineren Druck auf ihre Unterlage aus (die Größe dieses Druckes zu bestimmen, dient bekanntermaßen die Wage). 3) Wenn man das eine Ende eines Fadens befestigt, und das andere mit einem Körper verbindet, so wird der Faden stets gespannt, und zwar immer nach einer und derselben Richtung, welche bei genauer Untersuchung senkrecht zur Oberfläche der Erde ist.

Aus allen 3 Erfahrungen geht hervor, daß die Körper das Bestreben haben, sich nach der Erde zu bewegen, in der zweiten und dritten können sie zwar, durch die Unterlage und den befestigten Faden gehindert, nicht wirklich zur Bewegung gelangen, aber sie geben das Bestreben darnach doch in der zweiten Erfahrung durch den ausgeübten Druck, und in der dritten durch den Zug, durch welchen sie den Faden spannen, zu erkennen. Zugleich lernen wir aus 3, in welcher Richtung diese Bewegung erfolgen soll, wir sehen nämlich, sie sei stets senkrecht zur Oberfläche der Erde. Da nun die Erde eine Kugel ist, so müssen die gedachten Verlängerungen aller dieser Richtungen sich in dem Mittelpunkte der Erde durchschneiden. Alle terrestrischen Körper haben also das Bestreben, sich dem Mittelpunkte der Erde zu nähern, und diese allgemeine Eigenschaft derselben nennt man ihre Schwere.

Da nun die Körper nicht aus sich selbst ihren Zustand der Ruhe oder der Bewegung verändern können, so muß dieses Bestreben die Folge der Einwirkung einer Kraft sein, der man den Namen Schwerkraft beigelegt hat. Die oben angegebene Richtung, in welcher die Schwerkraft die Körper entweder wirklich bewegt, oder doch bewegen will, heißt vertikal oder lothrecht (bei dem dritten Versuch wählt man gewöhnlich zu dem Körper, welcher an dem Faden befestigt wird, eine kleine Bleikugel, und nennt dann die Vorrichtung ein Bleiloth), die darauf senkrechte Richtung horizontal oder wagrecht (die Oberflächen der Flüssigkeit in der Wasserwage, von welcher später die Rede sein wird, geben diese Richtung an). Von den Gesetzen, nach welchen die Schwerkraft wirkt, wird erst später gehandelt.

Die Größe des Drucks, welchen ein Körper in Folge der auf ihn einwirkenden Schwerkraft auf eine Unterlage ausübt, welche ihn an dem Fallen hindert, nennt man sein Gewicht. Da die Schwerkraft auf alle materiellen Theilchen einwirkt, so muß das Gewicht eines Körpers desto größer sein, aus je mehr materiellen Theilchen er besteht. Zur Messung desselben be-

Digitized by Google

dient man sich bekannter Gewichte, und zwar bei wissenschaftlichen Untersuchungen wegen der schon bei den Längenmaßen angeführten Vortheile jetzt fast allgemein des neuen französischen Gewichts. Die Einheit desselben ist das Gewicht von einem Cubikcentimeter reines Wasser im Zustande seiner größten Dichtigkeit, das Gramm. 1 Gramm = 10 Decigramm = 100 Centigramm = 1000 Milligramm, und 10 Gramm = 1 Decagramm, 10 Decagramm = 1 Hectogramm, 10 Hectogramm = 1 Kilogramm. Ein weiterer Vortheil des neuen französischen Gewichtssystems ist noch der, daß es uns ein leichtes Mittel bietet, das Volumen eines Hohlgefäßes auf eine einfache Weise zu bestimmen. Man hat nur nöthig, dasselbe mit Wasser zu füllen und das Gewicht desselben in Grammen zu finden, um zugleich zu wissen, wieviel Cubikcentimeter das Volumen des Hohlgefäßes beträgt. Im gewöhnlichen Leben wird das Gewicht noch bestimmt nach Zentner, Pfund, Loth, Quentchen und Gran (granum, das Korn, weil es gleich ist dem Gewicht eines Waizenkornes; 240 Gran = 1 Loth), doch sind schon Versuche gemacht, diese auf das französische Grammengewicht zu reduciren, und zwar so, daß meistens das Pfund zu $\frac{1}{2}$ Kilogramm angesetzt wird. Außerdem muß noch das in Apotheken gebräuchliche Medicinalgewicht erwähnt werden. Bei diesem hat ein Pfund (℔) 12 Unzen (ℨ) oder 96 Drachmen (ʒ) oder 288 Scrupel (℈) oder 5960 Gran (gr.). Das Pfund selbst aber ist nicht ganz $\frac{3}{4}$ von $\frac{1}{2}$ Kilogramm.

Das Gewicht eines Körpers hängt aber offenbar nicht bloß von der Menge seiner materiellen Theilchen, also von seiner Masse ab, sondern auch noch wesentlich von der Größe der Einwirkung der Schwerkraft (wo die Körper mit größerer Macht nach dem Mittelpunkte der Erde hingezogen werden, muß offenbar das Gewicht derselben unter sonst gleichen Umständen größer sein). Da aber für denselben Ort die Einwirkung der Schwerkraft auf die Körper sich gleich bleibt, so kann in dieser Beschränkung auch die Masse der Körper durch das Gewicht derselben gemessen werden.

Trotzdem daß die Schwere für eine allgemeine Eigenschaft der Körper gehalten wird, spricht man in der Physik doch auch von imponderablen Stoffen oder Imponderabilien (imponderabilis, unwägbar), also solchen Stoffen, auf welche die Schwerkraft nicht einwirkt. Es sind diejenigen hypothetischen Stoffe, welche man annimmt, um sich die Erscheinungen des Magnetismus, der Electricität, des Lichts und der Wärme zu erklären.

Das Gewicht der Körper, von welchem wir bisher gesprochen haben, nennt man das absolute Gewicht, und unterscheidet davon noch das specifische oder eigenthümliche Gewicht derselben. Wenn man nämlich das absolute Gewicht zweier verschiedenartiger Körper von gleichem Volumen aufsucht, so findet man, daß dasselbe durchaus nicht gleich ist. Es kann dies auch gar nicht befremden, da wir schon oben nachgewiesen haben, daß in demselben Volumen der eine Körper mehr Massentheilchen enthalte, als der andere, d. h. daß der eine dichter sei, als der andere.

Wenn wir dagegen die absoluten Gewichte verschiedener Volumina desselben Körpers bestimmen, so finden wir stets, daß sich diese absoluten Gewichte, wie die Volumina verhalten. Auch dies hat nichts Auffallendes, da es nur zeigt, daß bei demselben Körper die Molecüle sich stets in derselben gegenseitigen Lage befinden. Durch die Vergleichung der absoluten Gewichte verschiedener Körper bei gleichem Volumen erhalten wir nun den Begriff des specifischen

Digitized by Google

Gewichtes. Soll aber diese Vergleichung praktisch nutzbar werden, so war es nothwendig, daß man sich über einen Körper einigte, mit welchem man die übrigen in dieser Hinsicht verglich, dessen absolutes Gewicht bei einem bestimmten Volumen man als Einheit annahm. Aus Gründen, welche erst später erörtert werden können, hat man dazu das destillirte Wasser im Zustande seiner größten Dichtigkeit gewählt. Ist nun das absolute Gewicht eines anderen Körpers von demselben Volumen z. B. 7mal größer, als das des Wassers, so sagt man das specifische Gewicht des Körpers sei = 7. Während also das absolute Gewicht nur in benannten Zahlen ausgedrückt wird, kann das specifische Gewicht nur durch unbenannte Verhältnißzahlen bestimmt werden. Daß die Zahlen, welche das specifische Gewicht verschiedener Körper bezeichnen, zu gleicher Zeit auch das Verhältniß ihrer Dichtigkeiten angeben, ergibt sich aus dem Mitgetheilten. Wie sich das absolute Gewicht zum Begriff der Masse, so verhält sich das specifische zum Begriff der Dichtigkeit der Körper.

§. 12. **Allgemeine Gravitation; Ebbe und Fluth.** Als Newton mit der Erforschung der Bewegungsgesetze der Weltkörper, zunächst der Planeten um die Sonne und der Monde um ihre Planeten, beschäftigt war, hat er die wichtige Entdeckung gemacht, daß zwischen je 2 Körpern eine gegenseitige Anziehung stattfindet, welche nur durch die Größe ihrer Massen und ihre Entfernung von einander bedingt ist, so daß sie in demselben Verhältniß, wie die Massen, und im umgekehrten quadratischen Verhältniß der Entfernungen wächst. Die Erscheinungen der Schwere, von welchen im vorigen §. die Rede war, wurden nun leicht unter dieses allgemeine Naturgesetz gebracht. Man erkannte, daß das Bestreben der irdischen Körper, nach dem Mittelpunkte der Erde zu fallen, nur eine Folge sei der gegenseitigen Anziehung zwischen der Erde und diesen Körpern, daß aber trotz der Gegenseitigkeit sich doch nur der fallende Körper nach der Erde, und nicht letztere nach ersterem bewege, weil die Masse der fallenden Körper im Vergleich zur ganzen Masse der Erde verschwindend klein sei. Da also die wechselseitige Anziehung der Weltkörper im Wesentlichen dasselbe ist, wie die Schwere der terrestrischen Körper, so hat man ihr den Namen allgemeine Schwere oder Gravitation (gravis, schwer) beigelegt. Auch für die Wirksamkeit der Gravitation haben wir einen Beleg auf unserer Erde in den Erscheinungen der Ebbe und Fluth. Die Erfahrung lehrt nämlich, daß an den Küsten der Meere das Wasser täglich zweimal steigt (Fluth) und zweimal fällt (Ebbe). Die beiden Fluthen liegen ungefähr 12 Stunden auseinander, und ebenso die beiden Ebben. Wenn aber an einem Orte die Fluth an einem Tage ihre größte Höhe, z. B. Nachmittags 3 Uhr, erreicht hat, so wird sie am nächsten Tage die größte Höhe erst ungefähr 50 Minuten später erreichen, und sofort für jeden folgenden Tag immer ungefähr 50 Minuten später, als am vorhergehenden. Die Höhe der Fluthen ist nicht zu allen Zeiten gleich, man unterscheidet Springfluthen und Nippfluthen, je nachdem sie sich über die mittlere Höhe erheben, oder unter derselben zurückbleiben. Das tägliche Zurückbleiben um 50 Minuten erinnerte bald daran, daß auch der Mond an jedem folgenden Tage etwa 50 Minuten später durch den Meridian eines Ortes geht, ja man fand, daß für jeden Ort die Zeit der höchsten Fluth mit der Zeit, in welcher der

Digitized by Google

Mond durch den Meridian des Ortes geht, nahe zusammenfällt, und daß die darauf folgende Fluth dann eintritt, wenn der Mond die andere Hälfte dieses Meridians passirt. Man fand ferner, daß die Springfluthen stets zur Zeit des Voll- und des Neumondes, die Nippfluthen dagegen zur Zeit des ersten und des letzten Viertels beobachtet werden. Da der Mond eine elliptische Bahn um die Erde beschreibt, so ist er nicht immer in gleicher Entfernung von der Erde, sondern er kommt während eines Umlaufs der Erde einmal am nächsten, und entfernt sich einmal am weitesten von ihr. Genaue Beobachtungen zeigten, daß auch die verschiedene Entfernung des Mondes von der Erde einen Einfluß auf die Höhe der Fluthen hat, indem sie zur Zeit der Erdnähe des Mondes bedeutender sind, als zur Zeit der Erdferne. Alle die erwähnten Umstände mußten natürlich auf den Gedanken führen, daß die ganze Erscheinung der Ebbe und Fluth wohl hauptsächlich der anziehenden Kraft des Mondes zuzuschreiben sei. Da nun die Sonne vermöge ihrer bedeutend größeren Masse eine viel stärkere Anziehung auf die Erde ausüben muß, als der Mond, so war zunächst die Frage zu beantworten, warum wir nicht noch höhere Fluthen durch Einwirkung der Sonne hervorgebracht beobachten. Der Mond steht nur 60 Erdhalbmesser von dem Mittelpunkte der Erde ab, seine Entfernung von dem ihm nächsten Punkte der Erdoberfläche ist 59, und von dem dem vorigen gegenüberliegenden Punkte 61 Erdhalbmesser. Beide Punkte werden also von dem Monde in dem Verhältniß von 61^2 zu 59^2 angezogen, erleiden demnach eine merklich verschiedene Anziehung. Die Sonne dagegen steht über 20 Millionen geographische Meilen von unserer Erde ab, der Unterschied in der Entfernung des der Sonne nächsten und fernsten Punktes beträgt wieder nur einen Erddurchmesser, also 1720 geographische Meilen, eine Weite, welche gegen die 20 Millionen fast verschwindet, so daß man annehmen darf, daß beide Punkte von der Sonne fast gleich stark angezogen werden; wir werden aber sogleich sehen, daß grade in der verschiedenen Stärke der Anziehung die Erscheinung begründet ist.

Was nun das Erscheinen der Fluthen zur Zeit des oberen und unteren Durchgangs des Mondes durch den Meridian eines Ortes betrifft, so sei M

Figur 1.

(Fig. 1) der Mittelpunkt des Mondes, a der Ort auf der Erdoberfläche, durch dessen Meridian der Mond geht, und b der grade gegenüberliegende Punkt der Erdoberfläche, abcd ein durch a und b und den Mondmittelpunkt gehender Durchschnitt der Erdoberfläche. a wird von dem Monde stärker angezogen, als b in dem Verhältniß von 61^2 zu 59^2; ist nun bei a leicht bewegliches Wasser, so wird dadurch der Durchmesser ab etwas auseinander gezogen, also verlängert, und das Wasser muß von c und d nach a und b hin abfließen, wodurch bei a und b Fluth, bei c und d Ebbe entsteht. Die Wassermassen brauchen jedoch einige Zeit, um dem Zuge des Mondes zu folgen, und deßhalb fallen die Zeitpunkte der höchsten Fluth nicht genau mit dem Durchgang des Mondes durch den Meridian zusammen, sondern treten immer etwas später ein. Nach etwa 6 Stunden sind aber wegen der Axendrehung der Erde c und d an der Stelle von a und b, folglich haben diese jetzt Fluth und a und b Ebbe. Daß die Fluthen zur Zeit der Erdnähe des Mondes ver-

Digitized by Google

hältnißmäßig größer sind, erklärt sich einfach durch die stärkere Anziehung wegen der größeren Nähe. Beim Vollmond wird a nach M hin, b dagegen von der Sonne nach der entgegengesetzten Richtung gezogen, beim Neumond wird a von Mond und Sonne gemeinschaftlich in der Richtung nach M hin gezogen; in beiden Fällen wird also die Verlängerung des Durchmessers noch beträchtlicher, wodurch sich die Springfluthen erklären. Zur Zeit des ersten und des letzten Viertels wirkt die Anziehung der Sonne derjenigen des Mondes entgegen, indem die Sonne den Durchmesser cd und der Mond den Durchmesser ab zu verlängern sucht. Da aber die Verschiedenheit der Einwirkung des Mondes auf die Punkte a und b größer ist, als der Sonne auf die Punkte c und d, so entstehen doch noch bei a und b Fluthen, ihre Höhe ist jedoch durch die Gegenwirkung der Sonne vermindert, es sind Nippfluthen. Kein Binnenwasser, nicht einmal das Caspische Meer zeigt Ebbe und Fluth, weil in Wassermassen, welche keine große Ausdehnung haben, der Mond beinahe gleichweit von jedem Punkte entfernt ist, also keinen Anlaß zu irgend einem Hinströmen nach einer besonderen Stelle geben kann.

Zweites Kapitel.

Von den besonderen Eigenschaften der Körper.

§. 13. **Aggregatzustände; Cohäsion.** 1) Ein Stein behält in jedem Raume, in welchen man ihn bringt, seine Gestalt bei. Bringt man dagegen Wasser oder Luft in einen Raum, so richtet sich ihre Gestalt immer nach der Gestalt des Raumes, welchen sie einnehmen. 2) Wasser, nach einander in verschiedene Räume gebracht, zeigt, wenn sonst keine Einwirkung auf dasselbe stattfindet, stets dasselbe Volumen. Ist das Volumen des Raumes größer, als das des Wassers, so füllt es den Raum nur zum Theil aus; ist aber das Volumen kleiner, so läßt sich das Wasser nicht all in den Raum bringen. Bei der Luft ist es nicht so, sie hat gar kein bestimmtes Volumen; dieselbe Luft füllt nie einen Raum nur theilweise aus, sondern stets ganz.

Körper, die, wie der Stein, stets eine selbstständige Gestalt zeigen, heißen feste oder starre Körper, solche, bei welchen dies nicht der Fall ist, wie das Wasser und die Luft, flüssige Körper. Diejenigen unter den letzteren, welche, wie das Wasser, wenigstens noch ein selbstständiges Volumen haben, nennt man tropfbar flüssig, während die, welchen auch dieses abgeht, ausdehnsam flüssig oder luftförmig genannt werden. Diese 3 Modificationen, in welchen sich uns die Körper darstellen, nennt man die 3 Aggregatzustände oder Aggregationsformen (aggregare, zur Heerde hinzuthun), weil die Verschiedenheit der Körper in dieser Hinsicht nur bedingt sein kann durch die Art und Weise, wie in ihnen die einzelnen Theilchen zu einem Ganzen, zu einem Aggregat, verbunden sind. Der Aggregatzustand eines Körpers ist indessen nicht ein unterscheidendes Merkmal desselben, da derselbe Körper, ohne seine Natur zu ändern, ohne ein anderer Körper zu werden, verschiedene Aggregatzustände annehmen kann. Obgleich z. B. Wasser unter gewöhnlichen Umständen tropfbar flüssig ist, so ist es doch auch als Eis fest, und als Wasserdampf

Digitized by Google

ausdehnsam flüssig; Wasser, Eis und Wasserdampf ist aber seiner inneren Natur nach ein und dasselbe. Fragen wir nach der Ursache der verschiedenen Aggregatzustände, so muß diese in dem gegenseitigen Verhältniß der beiden Molecularkräfte, von welchen in §. 10 die Rede war, gesucht werden. Es können entweder beide, die Anziehungskraft und die Abstoßungskraft, gleich stark wirken, oder es kann die erstere oder endlich die letztere überwiegen. Im ersten Fall ist der Körper tropfbar flüssig, im zweiten fest und im dritten luftförmig. Wenn wir eine zwischen den kleinsten Theilchen der Körper wirksame Anziehungskraft annehmen, so ist die Folge davon, daß wir diesen Theilchen auch ein Bestreben, mit einander verbunden zu bleiben, zuschreiben müssen. Dieses Bestreben heißt die Cohärenz oder Cohäsion (cohaerere, zusammenhangen). Die Theilchen werden dann aber auch Allem, was ihren gegegenseitigen Zusammenhang aufheben will, einen Widerstand entgegensetzen, und diesen Widerstand nennt man die Cohäsionskraft. Aus dem, was über das verschiedene Verhältniß der Molecularkräfte bemerkt ist, geht hervor, daß auch die Größe der Cohäsionskraft in den 3 Aggregatzuständen verschieden sein muß, am größten bei den festen, geringer bei den tropfbar flüssigen, und am geringsten bei den ausdehnsam flüssigen Körpern. Daher kommt es denn auch, daß sehr häufig feste Körper als solche erklärt werden, deren Theile sich nur bei Anwendung einer bedeutenden Kraft trennen oder verschieben lassen, flüssige als solche, deren Theile sich sehr leicht trennen oder verschieben lassen. Bei den tropfbar flüssigen Körpern zeigt sich die Cohäsionskraft insofern noch wirksam, als sie in kleinen Massen sich selbst überlassen noch eine selbstständige Gestalt annehmen können, was bei den ausdehnsam flüssigen nicht der Fall ist; sie erscheinen dann in Kugelgestalt oder als Tropfen.

A. Eigenschaften der festen Körper.

§. 14. **Harte, weiche Körper.** Versuchen wir, die Theile eines Stückes Eisen zu verschieben oder von einander zu trennen, und versuchen wir dasselbe mit einem Stücke Wachs, so wird sich bald eine große Verschiedenheit herausstellen. Das Erste wird uns nur durch Anwendung einer sehr großen Kraft gelingen, das Zweite dagegen wird sich schon durch eine geringe Kraft bewerkstelligen lassen.

Wir sehen also, daß die Cohäsion, welche bei den festen Körpern am größten ist, doch bei verschiedenen festen Körpern auch verschiedene Größe hat. Darnach nennt man Körper, wie das Eisen, welche jeder Gestaltsveränderung einen großen Widerstand leisten, hart, die anderen dagegen, bei welchen das nicht der Fall ist, wie beim Wachs, weich. Es wird jedoch durch diese Unterscheidung keine Theilung der festen Körper in 2 getrennte Classen möglich, da sich keine scharfen Grenzlinien ziehen lassen, sondern nur ein allmähliger Uebergang stattfindet. Auch können dieselben Körper unter verschiedenen Bedingungen eine verschiedene Härte zeigen. So werden z. B. mehrere Metalle durch Hämmern, Walzen u. s. w. härter, durch Glühen weicher, da durch solche Operationen die Molecüle ihre gegenseitige Lage zu einander verändern, und dadurch auch das Verhältniß der Molecularkräfte zu einander ein anderes wird. Der verschiedene Härtegrad bildet in der Mineralogie mit ein wichtiges Unterscheidungszeichen der Mineralien. Von 2 Körpern von verschiedener Härte muß durch Ritzen mit

Digitized by Google

einer scharfen Kante der härtere in die Oberfläche des weicheren, dessen Cohäsion ja nicht so groß ist, eindringen können, nicht aber umgekehrt. Man hat, hierauf gestützt, eine eigene Härtescale entworfen, bestehend aus einer Reihe Mineralien von bekannter Härte, in welcher die weichsten obenan stehen, und welche mit dem Diamant als dem härtesten aller bekannten Körper schließt. Wenn dann die Härte eines Minerals mit einer unbenannten Zahl bezeichnet wird, so soll dies soviel heißen, als das Mineral habe ungefähr dieselbe Härte, als dasjenige, welches in der Härtescale unter dieser Zahl aufgeführt wird, d. h. es sei im Stande, alle vorangehenden der Scale zu ritzen, werde aber selbst von allen folgenden geritzt.

§. 15. **Spröde, elastische, dehnbare Körper.** 1) Wenn man die Theile einer Glasscheibe zu verschieben sucht, so wird dies nicht gelingen, sondern die Glasscheibe wird in Stücke zerbrechen (Glasthränen, Bologneser Fläschchen). 2) Nimmt man ein Stück Caoutchouc, und versucht dasselbe, so wird es gelingen, ohne daß die Theile desselben sich von einander trennen. Sobald aber die Ursache der Verschiebung aufhört, kehren die Theile wieder in ihre früheren Lagen zurück. 3) Nimmt man endlich einen geglühten Eisendraht, so wird es ebenfalls gelingen, aber die Theilchen werden, nachdem die Kraft, welche die Verschiebung hervorgerufen hat, zu wirken aufhört, ihre neuen Lagen beibehalten.

Auch in diesen Unterschieden äußert sich offenbar eine verschiedene Wirksamkeit der Cohäsionskraft, wenn wir auch nicht angeben können, wodurch sie bedingt ist. Körper, welche sich wie die Glasscheibe verhalten, d. h. solche, bei welchen der Zusammenhang der Theile schon bei einer geringen Verschiebung ganz aufgehoben wird, heißen *spröde*; solche dagegen, die wie der Caoutchouc zwar eine Verschiebung ihrer Theile zulassen, aber dann wieder ihre frühere Gestalt und ihr früheres Volumen einnehmen, *elastisch*; solche endlich, welche wie der geglühte Eisendraht auch eine Verschiebung ihrer Theile zulassen, ohne daß die Theile nach dem Aufhören der wirkenden Kraft in ihre ursprüngliche Lage zurückkehren, *dehnbar*. Auch hier ist nicht zu vergessen, daß diese Bestimmungen nur relativ sind, und nur innerhalb gewisser Grenzen Geltung behalten. Häufig, jedoch nicht allgemein, zeigt sich, daß harte Körper auch spröde, weiche dagegen dehnbar oder elastisch sind.

Von den genannten 3 Eigenschaften ist für uns wegen ihrer vielfachen Anwendbarkeit die Elasticität die wichtigste, weßhalb auch hier noch etwas näher darauf eingegangen werden soll. Die Elasticität der festen Körper kann sich auf 3 verschiedene Arten offenbaren, sie kann nämlich entweder der Ausdehnung oder Zusammendrückung des Körpers entgegenwirken (*Longitudinalelasticität*, longitudo, die Länge), oder der seitlichen Biegung (*Transversalelasticität*, transversum, die Quere), oder endlich der Drehung (*Torsionselasticität*, torsio, die Drehung). Die erstere finden wir z. B. beim Caoutchouc, einer Elfenbeinkugel u. s. w., die zweite beim spanischen Rohr, Fischbein u. s. w., die dritte bei Spiralfedern, Seidenfäden u. s. w. Darmsaiten zeigen alle 3 Arten der Elasticität. Daß die elastischen Körper, wenn die Kraft, welche ihre Gestalt und ihr Volumen verändert hat, zu wirken aufhört, ihre Gestalt und ihr Volumen wieder herstellen, kann nur Folge einer ihnen eigenthümlichen Kraft sein. Man hat derselben auch den Namen *Elasticität* oder *Federkraft* beigelegt.

Digitized by Google

Ein vollkommen elastischer Körper würde ein solcher sein, welcher unter allen Umständen und mit einer der seine Theile verschiebenden Kraft vollkommen gleichen Kraft stets vollständig seine frühere Größe und Form wieder herstellte. Einen solchen Körper kennt man aber nicht. Dagegen sind in einem gewissen Sinne alle festen Körper elastisch, jedoch nur innerhalb verschiedener Grenzen, welche für die einzelnen Körper durch die Größe der einwirkenden Kraft bestimmt werden. Sobald dann auf einen Körper eine stärkere Kraft einwirkt, zeigt er sich unelastisch. Von den praktischen Anwendungen der Elasticität erwähnen wir nur die Benutzung derselben zum Werfen von Geschossen bei dem Bogen und der Armbrust, als bewegende Kraft bei den Uhrfedern der Taschenuhren, bei den Druckfedern der Schlösser, den Gebrauch elastischer Federn in gepolsterten Stühlen und Sopha's u. s. w. Aber auch zu wissenschaftlichen Zwecken wird die Elasticität bei Instrumenten benutzt, durch welche die Größe gewisser Kräfte bestimmt werden soll. Solche Instrumente sind die Dynamometer (δύναμις, Kraft) oder Kraftmesser, und die Torsions- oder Drehwagen, von welchen die ersteren zur Messung großer, die letzteren sehr kleiner Kräfte verwandt werden. Bei den ersteren ist der Haupttheil gewöhnlich ein starker Stahlbügel, bei welchem aus der Größe der Zusammendrückung oder Ausdehnung, welche durch die zu messende Kraft bewirkt wird, auf die Größe dieser Kraft geschlossen wird; bei den letzteren ist der elastische Körper ein Metalldraht oder ein elastischer Faden, welcher durch Einwirkung einer anziehenden oder abstoßenden Kraft gedreht wird, die Größe der Kraft wird dann durch die Größe der Drehung gemessen.

Die Dehnbarkeit ist besonders bei mehreren Metallen, z. B. bei dem Gold, Platin, Silber, Zinn, sehr groß, und man benutzt sie bei der Anfertigung feiner Dräthe, zur Darstellung des Blattgoldes, Blattsilbers, Stanniols (stanniolium Zinnblatt). So läßt sich ein Gran Gold in einen Drath von 500 Fuß Länge ausziehen, oder in ein Blatt von mehr als 50 Quadratzoll schlagen.

§. 16. Absolute, relative, rückwirkende und Torsions-Festigkeit. 1) Wenn man aus demselben Körper mehrere Stäbe von gleicher Gestalt und gleichen Dimensionen anfertigt, den einen in verticaler Richtung am einen Ende befestigt, und am anderen Ende so viele Gewichte anhängt, bis er zerreißt, einen zweiten so lange senkrecht zu seiner Längendimension belastet, bis er zerbricht, einen dritten vertical auf eine Unterlage aufstellt, und ihm dann so lange Gewichte auflegt, bis er zerdrückt wird, einen vierten endlich am einen Ende befestigt, und ihn dann so lange um seine Längenare zu drehen sucht, bis er zerdreht wird; so wird man finden, daß in allen 4 Fällen die anzuwendenden Kräfte, welche erfordert werden, um die Theile des Körpers von einander zu trennen, verschieden sind. 2) Wenn man solche Stäbe aus verschiedenen Körpern anfertigt, und die Kräfte vergleicht, welche angewandt werden müssen, entweder um die Stäbe zu zerreißen, oder zu zerbrechen, oder zu zerdrücken, oder zu zerdrehen, so werden auch diese in den einzelnen Fällen sehr ungleich gefunden werden.

Während Nr. 2 eine Verschiedenheit der Cohäsion in verschiedenen festen Körpern unter ganz gleichen Umständen nachweiset, zeigt Nr. 1, daß die Cohäsion selbst bei demselben Körper bei verschiedener Art der Ein-

Digitized by Google

wirkung auf denselben verschieden ist. Die Größe des Widerstands, welchen ein Körper der Trennung seiner Theilchen entgegensetzt, heißt im Allgemeinen seine Festigkeit. Nach den 4 erwähnten Arten, eine Trennung seiner Theilchen zu bewirken, unterscheidet man auch eine vierfache Festigkeit, und nennt den Widerstand, welchen er dem Zerreißen entgegensetzt, die absolute oder Zug-, den, welchen er dem Zerbrechen entgegensetzt, die relative oder Bruch-, den, welchen er dem Zerdrücken entgegensetzt, die rückwirkende oder Druck-, und endlich den, welchen er dem Zerdrehen entgegensetzt, die Torsions- oder Dreh-Festigkeit desselben. Ohne uns auf Zahlenbestimmungen, welche genau angestellte Versuche geliefert haben, einzulassen, sollen hier nur die allgemeinen Gesetze aufgeführt werden, welche aus den Versuchen gezogen worden sind. Die absolute Festigkeit ist bei demselben Körper unabhängig von der Länge, wächst aber in gleichem Verhältniß wie der Querschnitt. Man mußte vermuthen, daß die harten Körper eine größere absolute Festigkeit hätten, als die weichen; es trifft dies auch im Allgemeinen zu, erleidet jedoch auch bedeutende Ausnahmen. So ist sie bei dem harten Zink viel geringer, als bei dem weicheren Kupfer. Bei den verschiedenen Holzarten ist die absolute Festigkeit größer in der Längsrichtung der Fasern, als in der Querrichtung. Die relative Festigkeit bei Balken von rechteckigem Querdurchschnitt wächst in gleichem Verhältniß mit der Breite, im umgekehrten mit der Länge, aber im quadratischen mit der Höhe des Balkens. Dabei macht es noch einen großen Unterschied, ob der Balken nur am einen Ende befestigt, und am freien Ende belastet ist, ob die Belastung gleichmäßig vertheilt ist, ob der Balken an beiden Enden unterstützt wird, und die Last in der Mitte desselben wirkt, oder ob sie auch in diesem letzteren Falle gleichmäßig über den ganzen Balken vertheilt ist. In diesen 4 angegebenen Fällen ist sie in jedem folgenden fast noch einmal so groß, als in dem vorhergehenden. Hohle Cylinder haben eine größere relative Festigkeit, als massive von gleicher Länge und gleicher Größe des Querschnitts. Die rückwirkende Festigkeit wächst auch in demselben Verhältniß wie der Querschnitt, wird aber mit der Höhe kleiner. Auch hier ist sie bei hohlen Cylindern größer, als bei massiven von gleicher Länge und gleichem Querschnitt. Die Torsionsfestigkeit kommt bei der praktischen Anwendung wenig in Betracht. Daß man bei Bauten wegen der zu erzielenden Sicherheit nicht die ganzen durch die Versuche gefundenen Zahlen in Rechnung bringen darf, sondern nur einen kleinen Theil derselben, ist klar; welchen Theil, hat die Praxis festgestellt.

Von den untersuchten Körpern besitzt unter den Metallen das Eisen, und unter den verschiedenen Holzarten das Eichen- und das Buchenholz die größte Festigkeit.

§. 17. **Krystallisation.** An den festen Körpern finden wir auch noch folgende äußere Verschiedenheit. Einige haben eine regelmäßige, von ebnen Flächen begrenzte Gestalt, andere nicht. Man nennt die ersteren Krystalle. Wir beobachten ihre Entstehung häufig bei dem Uebergang eines Körpers aus dem flüssigen in den festen Aggregatzustand, sei es, daß dieser Uebergang durch das Erkalten eines geschmolzenen Körpers, sei es, daß er durch Ausscheidung aus einer Auflösung stattfindet. Wahrscheinlich sind die in

Digitized by Google

der Natur vorkommenden Krystalle auf ähnliche Weise entstanden. Die Krystallisation pflegt zuerst immer an festen Körpern, welche mit der Flüssigkeit in Berührung sind, wie z. B. an den Wänden des Gefäßes, zu beginnen (durch den Saft des Zuckerrohrs werden zur Gewinnung des Kandiszuckers Fäden gezogen). Jedem Körper kommt in der Regel nur eine, ihm eigenthümliche Krystallform zu, und wenn auch verschiedene Krystalle desselben Stoffs keine absolut gleiche Gestalt im geometrischen Sinne zeigen, so haben sie doch alle denselben Grundtypus. Dadurch wird die Kenntniß der Krystallformen oder die Krystallographie dem Mineralogen sowohl, wie dem Chemiker unentbehrlich, da sie beiden ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal verschiedener Körper an die Hand gibt. Aber auch für den Physiker ist sie wichtig, da die meisten Krystalle nach verschiedenen Richtungen auch einen verschiedenen Grad der Cohäsion und eine verschiedene Elasticität zeigen, wodurch wieder, wie später erhellen wird, eine große Zahl anderer physicalischer Erscheinungen bedingt ist. Die Verschiedenheit der Cohäsion gibt sich in vielen Krystallen dadurch zu erkennen, daß sie nach gewissen Richtungen vorzüglich leicht spaltbar sind (Glimmer, krystallisirter Gyps, Kalkspath u. s. w.). Stets ist bei den Krystallen die Materie um einen inneren Punkt symmetrisch vertheilt, und durch diesen Punkt lassen sich 3 oder 4 gerade Linien gezogen denken, so daß die Krystallflächen zu denselben ebenfalls eine gewisse Symmetrie zeigen. Diese geraden Linien nennt man die Axen des Krystalls. Mit Berücksichtigung der Axen lassen sich alle die mannichfaltigen Krystallformen in 6 verschiedene Krystallsysteme einordnen. Diese mögen hier, weil ihre Kenntniß später nothwendig ist, kurz erwähnt werden. Es sind folgende: 1) das reguläre System, in welchem jeder Krystall 3 einander gleiche und auf einander senkrechte Axen hat; 2) das 2 und 1 axige oder quadratische, in welchem ebenfalls alle 3 Axen senkrecht auf einander stehen, aber nur 2 einander gleich sind, das quadratische genannt, weil die Durchschnittsebene durch die 2 gleichen Axen ein Quadrat ist; 3) das 3 und 1 axige oder hexagonale, welches 4 Axen hat, von welchen 3 in derselben Ebene einander gleich sind, und sich gegenseitig unter einem Winkel von 60° durchschneiden, während die vierte senkrecht durch ihren gemeinschaftlichen Durchschnittspunkt geht, das hexagonale genannt, weil die Durchschnittsebene durch die 3 gleichen Axen ein Hexagon oder Sechseck ist; 4) das 1 und 1 axige oder rhombische, bei welchem die 3 auf einander senkrechten Axen alle ungleich sind, das rhombische genannt, weil eine durch je 2 Axen gelegte Durchschnittsebene immer ein Rhombus ist; 5) das 2 und 1 gliedrige oder monokliniſche (μόνος, allein, und κλίνειν, neigen), in welchem von den 3 ungleichen Axen 2 sich unter schiefen Winkeln durchschneiden, während die dritte auf ihrer Ebene senkrecht steht; 6) das 1 und 1 gliedrige oder trikliniſche (τρι- in Zusammensetzungen drei, dreifach und κλίνειν, neigen), in welchen die 3 ungleichen Axen auch alle schief auf einander stehen. In dem zweiten und dritten Systeme heißt die ungleiche Axe die krystallographische Hauptaxe. Wenn man eine Krystallform aus einer andern dadurch entstanden denken kann, daß die Hälfte der Flächen bis zum Verschwinden der übrigen gewachsen ist, so nennt man die erstere die hemiedrische (ἡμι- in Zusammensetzungen halb und ἕδρα Fläche) Form der letzteren.

Digitized by Google

§. 18. **Adhäsion.** 1) Wenn man 2 Bleikugeln an 2 Stellen eben schneidet, und sie dann, so lange die Schnittflächen noch metallisch blank sind, an einander drückt, so halten sie fest zusammen. Nimmt man zu dem Versuche 2 sehr sorgfältig auf einander abgeschliffene Platten von Messing, die mit Handhaben versehen sind, so gehört oft eine große Gewalt dazu, um die Platten wieder von einander zu trennen. 2) Der Staub bleibt an den verticalen Wänden und an der Decke unserer Zimmer haften, da er doch nicht unterstützt ist, und also vermöge der Schwere herabfallen sollte; ebenso beim Schreiben mit Kreide die Kreidetheilchen an den Tafeln, beim Schreiben oder Zeichnen mit Bleistift die Graphittheilchen an dem Papier. 3) Das Verzinnen des Bleies und das Plattiren des Kupfers geschieht so, daß bei dem ersteren eine Bleiplatte mit einer Zinnplatte und bei dem letzteren eine Kupferplatte mit einer Silberplatte durch Glättwalzen gezogen werden.

Hier begegnen wir Erscheinungen, die denen der Cohäsion ganz ähnlich sind. Während die Cohäsion aber beschränkt ist auf die Theilchen eines und desselben Körpers, zeigt sich hier eine Anziehung zwischen Theilchen verschiedener Körper bei der unmittelbaren Berührung derselben. Wenn in 1 diese Anziehung der Theilchen an zwei Körpern desselben Stoffs wahrgenommen wird, so ersehen wir aus 2 und 3, daß sie auch bei Körpern verschiedenen Stoffs stattfindet. Zum Unterschiede von der Cohäsion hat man dieser Art der Anziehung den Namen Adhäsion (adhaerēre anhangen) gegeben, und der Kraft, als deren Folge man diese Anziehung ansieht, den Namen Adhäsionskraft. Apparate, wie die in dem ersten Versuche erwähnten Messingplatten, heißen Adhäsionsplatten. Wenn es schon in dem Begriffe der Adhäsion liegt, daß sie desto stärker wird, in je mehr Punkten die beiden Körper sich berühren, so finden wir dafür auch noch die experimentelle Bestätigung in dem Umstande, daß die Adhäsionsplatten mit um so größerer Kraft an einander haften, je vollkommener sie eben geschliffen sind. Ebenso wird durch den Druck der Glättwalzen beim Plattiren des Kupfers und Verzinnen des Bleies eine innige Berührung der beiden auf einander gelegten Metallplatten herbeigeführt, und dadurch das feste Anhaften des Silber- und Zinnüberzugs bewirkt. Auch der Goldüberzug, welchen die Körper sowohl durch die Vergoldung in Feuer, als auch durch die galvanische erhalten, haftet auf dem vergoldeten Gegenstande nur durch die Adhäsion zwischen dem Gold und dem Gegenstande.

Von der Adhäsion zwischen einem festen Körper und einem Körper eines anderen Aggregatzustandes, sei es ein tropfbar flüssiger oder ein luftförmiger, wird noch in der Folge die Rede sein.

B. Eigenschaften tropfbar flüssiger Körper.

§. 19. **Flüssigkeit, Tropfbarkeit.** 1) Wenn man einen festen Körper in Wasser, oder in Oel, oder in Syrup bewegen will, so wird dies nicht immer in allen 3 Fällen mit gleicher Leichtigkeit geschehen können. 2) Gießt man verschiedene tropfbar flüssige Körper, wie z. B. die 3 eben genannten, aus einem Gefäße mit engem Halse aus, so wird man finden, daß in gleichen Zeiten und unter sonst gleichen Umständen eine verschiedene Quantität ausfließt, je nachdem das Gefäß mit der einen oder der andern Flüssigkeit gefüllt ist. 3) Schmilzt man das eine Ende einer Glasstange, so sind

Digitized by Google

die herabfallenden Glastropfen keine kugelförmige Körper, sondern haben eine länglichte, birnförmige Gestalt (Glasthränen).

Fragen wir nun nach der Ursache der angeführten Erscheinungen, so erklären sich die beiden ersten offenbar nur dadurch, daß man annimmt, die Verschiebbarkeit der Theilchen sei in den verschiedenen genannten Körpern verschieden, daß man also annimmt, es gebe verschiedene Grade der Flüssigkeit. Je größer diese Verschiebbarkeit ist, desto geringer ist der Natur der Sache nach der Widerstand, welchen ein sich bewegender Körper in dem flüssigen Körper findet, desto geringer ist auch der Widerstand, unter welchem die Theilchen des flüssigen Körpers selbst über einander hingleiten und mit desto größerer Geschwindigkeit werden sie sich demnach auch bewegen können (die Geschwindigkeit der aus einem Gefäße ausfließenden Theilchen bestimmt aber die Menge, welche in einer gegebenen Zeit ausfließt). Eine vollkommene Flüssigkeit wäre eine solche, bei welcher die Theilchen eine absolute Verschiebbarkeit besäßen, eine solche kennt man aber nicht, sondern die flüssigen Körper sind in dieser Hinsicht ebenso verschieden von einander, wie die festen Körper in Beziehung auf ihre Festigkeit. Die Erscheinungen der Festigkeit und Flüssigkeit erklären sich, wenn wir annehmen, daß bei den festen Körpern die gegenseitige Anziehung der Molecüle nur nach bestimmten Richtungen erfolgt, daß dagegen bei den tropfbar flüssigen Körpern die einzelnen Molecüle sich nach allen Richtungen mit gleicher Stärke anziehen. Wie sich die tropfbar flüssigen Körper von den festen durch ihre Flüssigkeit unterscheiden, so unterscheiden sie sich von den ausdehnsam flüssigen durch ihre Tropfbarkeit. Aber die in 3 erwähnte Erfahrung zeigt, daß auch diese Eigenschaft nicht allen in gleichem Grade zukommt, sondern daß auch hier Abstufungen und allmählige Uebergänge stattfinden.

§. 20. **Cohäsion.** Hängt man eine Glasplatte in ihrem Schwerpunkte an dem einen Ende des Balkens einer empfindlichen Wage auf, bringt die Wage durch Auflegen von Gewichten auf die am anderen Ende hängende Schale in's Gleichgewicht, und nähert dann der Glasplatte in einem weiten Gefäß vorsichtig eine Wasserfläche bis zur gegenseitigen Berührung, so wird man nach und nach noch ein ziemliches Gewicht auf die Wagschale auflegen können, bis die Glasplatte von dem Wasser getrennt wird. Die Glasplatte selbst aber ist nach der Trennung nicht trocken, sondern ganz von Wasser benetzt.

Aus diesem letzteren Umstande geht hervor, daß das zugelegte Uebergewicht nicht das Glas von dem Wasser, sondern die Wassertheilchen von einander getrennt hat, daß man also nach der Größe desselben die Größe der Cohäsion der Wassertheilchen messen könne. Der Versuch zeigt nun, daß diese Cohäsion gar nicht unbedeutend sei. Wenn man daher häufig liest, ein tropfbar flüssiger Körper sei ein solcher, dessen Theile sich sehr leicht trennen und über einander verschieben lassen, so muß man sich sehr vor dem Mißverständnisse hüten, als ob die Trennbarkeit und Verschiebbarkeit der Theilchen den Flüssigkeiten in gleichem Grade zukäme. Die leichte Verschiebbarkeit bedingt das Wesen der Flüssigkeit, nicht aber die leichte Trennbarkeit, und die letztere kann ihr nur im Vergleich zu der Cohäsion der festen Körper beigelegt werden.

§. 21. **Adhäsion.** 1) Bringt man auf eine ebene Glasplatte etwas Wasser, und legt dann eine andere solche Platte darauf, so haften beide

Digitized by Google

Glasplatten fest an einander, und wenn man sie aus einander reißt, so sind sie beide mit einer Schicht Wasser bedeckt (vergl. den Versuch im vorhergehenden §). 2) Beim Leimen, Kitten und Löthen bringt man zwischen 2 gut an einander passende Flächen fester Körper eine flüssige Substanz (den Leim, den Kitt, oder das Loth). Wenn dann die flüssige Substanz durch Trocknen oder Erkalten in den festen Zustand übergeht, so haften die beiden Flächen sehr fest an einander. 3) Ein Wassertropfen, auf eine reine Glasfläche gebracht, breitet sich auf derselben aus. Ist die Glasfläche fettig oder staubig, so zerfließt der Tropfen nicht. Ein Quecksilbertropfen zerfließt ebenfalls nicht auf einer Glasfläche, auch wenn sie ganz rein ist. Ein Quecksilbertropfen zerfließt aber auf einer Zinn- und vielen andern Metallflächen (nicht auf einer Eisenfläche), während Wassertropfen auf blanken Metallflächen nicht zerfließen. 4) Flüssigkeiten in Gefäßen, welche von ihnen benetzt werden, stehen am Rande etwas höher, als in der Mitte, haben also eine concave (concavus, vertieft) Oberfläche; in Gefäßen dagegen, welche von ihnen nicht benetzt werden, stehen sie in der Mitte höher, als am Rande, sie haben eine convere (convexus, gewölbt) Oberfläche. 5) Wird ein Stäbchen in eine Flüssigkeit getaucht, von welcher es naß wird, so erhebt sich die Flüssigkeit rings um dasselbe; in einer Flüssigkeit dagegen, von welcher es nicht naß wird, bildet die Flüssigkeit ringsum eine kleine Vertiefung. 6) Läßt man einen Oeltropfen auf eine Wasserfläche fallen, so breitet sich derselbe sehr rasch auf derselben aus. Hatte man zu dem Versuche fettes Oel angewandt, und bringt dann Tropfen von ätherischem Oele hinzu, so wird die zuerst gebildete Oelschichte verdrängt und es bildet sich eine von ätherischem Oele; ebenso wird eine auf dem Wasser gebildete Schicht von einem ätherischen Oele durch Weingeist verdrängt.

Die hier mitgetheilten Erfahrungen und Versuche zeigen, daß sowohl zwischen gewissen festen Körpern und tropfbaren Flüssigkeiten, als auch zwischen verschiedenen tropfbaren Flüssigkeiten Adhäsion stattfinden kann. Zugleich geht aus 1, sowie aus dem Versuche des vorhergehenden §. hervor, daß die Adhäsion der Flüssigkeiten an festen Körpern größer ist, als die Cohäsion der flüssigen Theilchen an einander. Dasselbe lehrt uns auch der dritte Versuch, da ja die Tropfenbildung nur eine Folge der Wirksamkeit der Cohäsionskraft sein kann. Wir sehen aber auch außerdem noch aus 3 und den beiden folgenden Nummern, daß nicht jeder feste Körper zu jeder Flüssigkeit Adhäsion zeige, sondern nur zu denjenigen, von welchen er benetzt wird. Aus den Erfahrungen, welche man beim Leimen, Kitten und Löthen macht, sowie aus dem Umstande, daß die messingenen Adhäsionsplatten viel stärker zusammenhaften, wenn man sie vor der Berührung mit einer dünnen Oelschicht bestrichen hat, ist ersichtlich, daß in der Regel die Adhäsion zwischen einem festen und einem flüssigen Körper noch stärker ist, als zwischen 2 festen Körpern. Die Ursache hiervon kann keine andere sein, als daß die Anzahl der Berührungspunkte im ersten Fall viel größer ist, als in dem zweiten, da es ja nicht möglich ist, festen Körpern vollkommen ebene Flächen zu geben, während eine Flüssigkeit, welche einen festen Körper benetzt, und auf einer Fläche desselben ausgebreitet wird, ihn in allen Punkten berührt. Bei den erwähnten Operationen dauert die innige Berührung nach der Erstarrung des flüssigen Mittels fort, und es kommt noch die Cohäsion des fest gewordenen Bindemittels hinzu, um die vorher

Digitized by Google

getrennt gewesenen Flächen zusammenzuhalten. Aus 6 lernen wir noch, daß es auch bei der Adhäsion zwischen verschiedenen Flüssigkeiten verschiedene Grade gibt, daß sie z. B. zwischen Wasser und Weingeist größer ist, als zwischen Wasser und flüchtigen Oelen, und die Adhäsion zwischen letzteren wieder größer, als zwischen Wasser und fetten Oelen.

Die Adhäsion zwischen festen und flüssigen Körpern wird bei der Vera'schen Seilmaschine zum Heben von Wasser benutzt. Diese Maschine besteht aus einem Seil ohne Ende, welches um 2 über einander befindliche Wellen geht, von denen die untere sich in dem Wasserbehälter, die obere aber an der Stelle befindet, bis zu welcher das Wasser gehoben werden soll. Durch eine Kurbel wird die obere Welle gedreht, wodurch auch das Seil um die beiden Wellen bewegt wird. Durch schnelles Drehen wird stets eine Quantität Wasser mit dem Seile gehoben, welches da, wo das Seil anfängt, wieder nach Unten zu gehen, abfällt, und in einem eigenen Behälter gesammelt werden kann.

§. 22. **Fortsetzung; Auflösung, Mischung und Absorption.** 1) Bringt man Kochsalz oder Zucker in ein Gefäß mit Wasser, so sehen wir diese festen Körper immer kleiner werden und nach und nach ganz verschwinden. 2) Wenn eine specifisch leichtere Flüssigkeit auf eine specifisch schwerere, z. B. Oel auf Wasser, gegossen wird, so sehen wir in der Regel, daß sich die leichtere über der schwereren lagert, und eine eigene Schicht bildet. In anderen Fällen aber, z. B. wenn man Weingeist zu Wasser gießt, findet dies nicht statt, sondern es entsteht ein ganz gleichförmiges Gemenge beider tropfbaren Flüssigkeiten. 3) Leitet man kohlensaures Gas durch Wasser, oder läßt man Wasser mit Kohlensäure in Berührung, so nimmt das Wasser Kohlensäure auf. Füllt man einen Glascylinder mit Ammoniakgas, und setzt denselben nachher in eine Schale mit Wasser, so füllt in wenig Augenblicken das Wasser den ganzen Cylinder an.

Zum richtigen Verständniß der unter 1 genannten Erscheinungen darf nicht übersehen werden, daß das Wasser, nachdem das Salz oder der Zucker nicht mehr wahrgenommen wird, außer seinen eigenen Eigenschaften auch noch diejenigen des Salzes oder des Zuckers zeigt, wie man sich in beiden Fällen leicht durch den Geschmack überzeugen kann. Daraus geht hervor, daß sich der feste Körper in unendlich viele und unendlich kleine, mit dem Geschte nicht mehr unterscheibbare Theilchen getrennt hat, und daß diese Theilchen des festen Körpers sich in der Flüssigkeit gleichmäßig vertheilt haben. Das entstandene Gemenge beider Körper nennt man eine Auflösung des festen Körpers in dem flüssigen. und den flüssigen Körper das Auflösungsmittel. Der Umstand, daß sich ein fester Körper nur in einer solchen Flüssigkeit auflöst, von welcher er benetzt wird, zeigt, daß der ganze Vorgang eine Folge der Adhäsion ist. Die Adhäsion muß aber hier noch viel stärker wirksam sein, als in den in dem vorigen §. betrachteten Fällen, denn die Flüssigkeit benetzt nicht nur den festen Körper, sondern sie zieht sich auch zwischen die Theilchen desselben hinein, und wächst durch die große Anzahl von Berührungspunkten in einem solchen Grade, daß sie sogar die Cohäsion der Theilchen des festen Körpers überwindet und aufhebt. Ist aber die Auflösung eine Folge der Adhäsion, so ist auch klar, warum nicht jede Flüssigkeit jeden festen Körper aufzulösen im Stande ist. Außerdem lehrt die Erfahrung noch, daß ein bestimmtes Quantum

Digitized by Google

einer Flüssigkeit von einem bestimmten festen Körper auch nur ein ganz bestimmtes Quantum aufzulösen vermöge, und daß, wenn man von dem festen Körper mehr in die Flüssigkeit bringt, Alles, was über das Quantum hinausgeht, ungelöst bleibt. Auf dieses Quantum hat jedoch oft auch die Temperatur der Flüssigkeit Einfluß, indem die Flüssigkeit bei höherer Temperatur gewöhnlich mehr aufzulösen vermag, als bei niedrigerer Temperatur. Wenn eine Flüssigkeit von einem festen Körper die größtmöglichste Menge aufgelöst hat, so sagt man, sie sei mit demselben gesättigt.

Daß sich Flüssigkeiten von verschiedenem specifischem Gewichte schichtenweise über einander lagern, und zwar so, daß diejenige mit dem größten specifischen Gewichte die unterste Stelle erhält, ist nur Folge der Schwere und der leichten Verschiebbarkeit der Theilchen. Wenn aber, wie in dem angeführten Beispiele von Wasser und Weingeist, die schichtenweise Ablagerung nicht stattfindet, sondern wenn durch das Zusammenbringen zweier verschiedener Flüssigkeiten ein gleichförmiges Gemenge erzeugt wird, das noch die Eigenschaften seiner Bestandtheile zeigt, so kann dies keinen anderen Grund haben, als daß die Theilchen beider Flüssigkeiten gewissermaßen nach allen Richtungen hin an einander zerfließen. Auch diese Erscheinung wird also hervorgebracht durch einen hohen Grad von Adhäsion zwischen den beiden Flüssigkeiten. Das entstehende Gemenge nennt man eine Mischung. Die Mischung unterscheidet sich von der Auflösung nur dadurch, daß zu ihr 2 tropfbare Flüssigkeiten, zu einer Auflösung aber ein fester Körper und eine tropfbare Flüssigkeit erfordert werden. Wenn bei der Auflösung die Adhäsion so stark war, daß sie die Cohäsion eines festen Körpers überwand, so sehen wir sie bei der Mischung die Wirkung der Schwere, wenn auch nicht überwinden, doch wenigstens modificiren. Da sich Wasser und Weingeist in allen möglichen Verhältnissen zu einer Mischung vereinigen lassen, und da dasselbe auch von anderen Flüssigkeiten, welche sich mischen lassen, gilt, so kann bei einer Mischung von einer Sättigung, wie dies bei den Auflösungen der Fall war, nicht die Rede sein.

Was endlich die letzte der oben angeführten Erscheinungen betrifft, so unterscheidet sie sich von den vorhergehenden nur dadurch, daß die Adhäsion zwischen einer tropfbaren und einer ausdehnsamen Flüssigkeit wirksam ist. Man nennt ein solches Einsaugen einer ausdehnsamen Flüssigkeit Absorption (absorbēre verschlucken). Absorption der Gase findet aber nicht blos durch tropfbare Flüssigkeiten statt, sondern auch durch feste Körper, namentlich durch poröse und fein gepulverte. Man überzeugt sich davon leicht durch folgenden Versuch: Man fülle einen Glascylinder mit kohlensaurem Gas, und setze ihn auf das in einer Schale befindliche Quecksilber; dann bringe man von Unten ein Stückchen frisch ausgeglühter Buchsbaumkohle hinein, und man wird das Quecksilber schnell in den Cylinder steigen sehen, weil durch die poröse Kohle das Gas absorbirt wird. Da die Gase vermöge ihrer Ausdehnsamkeit das Bestreben haben, einen immer größeren Raum einzunehmen, bei der Absorption aber von Flüssigkeiten und festen Körpern verdichtet werden, so sehen wir, daß die Adhäsion auch theilweise die Ausdehnsamkeit vernichten kann, grade wie sie bei der Auflösung der Cohäsion und bei der Mischung der Schwere entgegenwirkte. Zeigten die Mischungen Nichts von einem Sättigungspunkte, so finden wir bei der Absorption doch wieder etwas Aehnliches, wie bei den Auflösungen; es kann

Digitized by Google

nämlich ein Körper von einem Gase nur eine ganz bestimmte Menge absorbiren. Das Schäumen gewisser Mineralwasser, der moussirenden Weine, des Bieres u. s. w. erklärt sich dadurch, daß das in diesen Flüssigkeiten absorbirt gewesene Gas sich von denselben losreißt und austritt.

§. 23. **Fortsetzung; Capillarität.** 1) In 2 oder mehreren Gefäßen, welche eine solche Gemeinschaft mit einander haben, daß eine Flüssigkeit frei aus dem einen in das andere übertreten kann (communicirende Röhren), fallen die Oberflächen der Flüssigkeit in allen immer in ein und dieselbe Horizontalebene. Taucht man aber ein Glasröhrchen mit feiner Oeffnung in ein Gefäß mit Wasser, so sieht man das Wasser in dem Röhrchen bedeutend über die Oberfläche in dem Gefäße steigen, und zwar um so höher, je enger das Röhrchen ist. Taucht man dagegen ein solches Röhrchen in ein Gefäß mit Quecksilber, so steht dieses in dem Röhrchen tiefer, als in dem Gefäße. 2) Wenn ein Stück Zucker Wasser oder Milch auch nur an einigen wenigen Punkten berührt, so wird es doch nach und nach ganz feucht. Das Oel, der Weingeist, das geschmolzene Wachs oder der geschmolzene Talg ziehen sich in den Dochten unserer Lampen und Kerzen in die Höhe. 3) Bütten und Fässer, welche lange trocken gestanden haben, werden leck; bringt man sie dann aber einige Zeit in Wasser, so schließen sich die Dauben wieder dicht an einander. Beim Aufziehen des Zeichenpapiers auf Reißbretter wird das Papier befeuchtet, ehe es angeleimt wird; wird es dann trocken, so zeigt es sich überall gespannt. 4) Zwei Korkkügelchen üben auf einer Wasserfläche gar keine Einwirkung auf einander aus, wenn sie einigermaßen weit von einander entfernt sind; wenn sie aber einander so nahe gebracht sind, daß das Wasser zwischen beiden keine Ebene mehr bildet, so erfolgt eine lebhafte Anziehung. Zwei Wachskügelchen ziehen sich unter gleichen Umständen ebenfalls an, aber ein Korkkügelchen und ein Wachskügelchen stoßen sich ab.

Der Umstand, daß die in 1 erwähnten Erscheinungen davon abhängig sind, daß die Flüssigkeiten den Stoff, aus welchem die Röhrchen gemacht sind, benetzen oder nicht, zeigt, daß auch diese Erscheinungen unter die Adhäsionserscheinungen gerechnet werden müssen. Man hat jedoch dieser besonderen Modification der Adhäsion den eigenen Namen **Capillarität** (**capillus** das Haar) beigelegt, weil man zu dergleichen Versuchen Röhrchen mit sehr engen Oeffnungen, s. g. **Haarröhrchen** (**tubi capillares**), deren innerer Durchmesser etwa der Dicke eines Haares gleich ist, anwenden muß. Man erklärt sich das Phänomen so: Hat die Flüssigkeit Adhäsion zu dem Röhrchen, so erhebt sie sich im Innern desselben ringsum an den Wänden. Da nun aber die Röhrchen einen sehr kleinen Durchmesser haben, so stehen die ringsum gehobenen Wassertheilchen einander sehr nahe, und fließen zusammen. Die Flüssigkeit steigt nun von Neuem in die Höhe, fließt wieder zusammen u. s. f., und dies dauert so lange, bis das Gewicht des gehobenen Wassersäulchens und die Cohäsion mit dem Wasser außer dem Röhrchen im Gleichgewicht ist mit der Anziehung des Röhrchens. Daher steigen auch verschiedene Flüssigkeiten in Haarröhrchen von gleichem Durchmesser bis zu verschiedenen Höhen, Alkohol z. B. weniger hoch, als Wasser. Benetzt dagegen die Flüssigkeit das Röhrchen nicht, so senkt sie sich ringsum an den inneren Wänden desselben, die mittleren Theilchen werden durch ihre Cohäsion mit den übrigen mitherabgezogen, sie senkt sich von Neuem

Digitized by Google

u. s. f. Wenn die Flüssigkeit in dem Röhrchen höher steht, als in dem anderen Gefäße, so spricht man von einer Capillar-Attraktion (Haarröhrchen-Anziehung), im entgegengesetzten Falle von einer Capillar-Depression (Haarröhrchen-Herabdrückung). Von den Gesetzen, nach welchen diese Erscheinungen erfolgen, wird später die Rede sein. Hier soll nur so viel erwähnt werden, daß nach der Erfahrung Attraktion sowohl, als Depression desto bedeutender werden, je enger die Röhrchen sind.

Die Phänomene in 2 sind eigentlich dieselben, wie die eben besprochenen. Die Zwischenräume poröser Körper, wie des Zuckers, haben mehr oder weniger Gemeinschaft mit einander; sie bilden Kanäle, welche verschieden gebogen sind, und ihres kleinen Durchmessers wegen als Haarröhrchen wirken. Bei den Dochten entstehen diese Kanäle durch die neben einander sehr nahe und parallel liegenden Fäden. Wie beim Zucker, so zieht sich auch das Wasser vermöge der Capillarität in Holz und Papier (3). Das eingedrungene Wasser dehnt diese dann aus, wie wir dies besonders bei eingetrockneten festen Körpern organischen Ursprungs oft in hohem Grade beobachten. Durch diese Ausdehnung werden die lose gewordenen Dauben wieder genähert und schließen sich von Neuem fest an einander. Die Ausdehnung des Zeichenpapiers hält natürlich nur so lange an, als nicht das Wasser, mit welchem man es benetzt hat, wieder verdunstet ist. Dann aber zieht es sich wieder zusammen, wodurch dasselbe die nöthige Spannung erhält. Man macht auch von der Ausdehnung, welche das vermöge der Capillarität in Holz eingedrungene Wasser bewirkt, in den Gewerben eine Anwendung. Wenn man nämlich ein Stück Holz krümmen will, so hält man diejenige Seite desselben, welche concav werden soll, über ein Feuer, während man die gegenüberliegende naß macht. Die Hitze des Feuers entzieht der genäherten Seite die Feuchtigkeit und bewirkt, daß sich die Theilchen einander nähern, das Wasser dagegen treibt auf der andern Seite die Theilchen von einander. Bei den Stricken liegen die Kanäle, welche als Haarröhrchen wirken, durch die Drehung, welche die hänfenen Fäden bei der Anfertigung erlitten haben, senkrecht zur Länge derselben. Die Stricke werden daher auch, wenn sie befeuchtet werden, nicht länger, sondern dicker und dadurch kürzer. Von der Größe der Kraft, mit welcher solche Ausdehnungen bisweilen erfolgen, kann man sich einen Begriff machen, wenn man liest, daß man mittelst derselben Felsenstücke dadurch spalten könne, daß man in eine Ritze dünne Keile aus sehr trocknem, harten Holze eintreibt, und dieselben dann von Zeit zu Zeit mit Wasser benetzt. Ebenso wird erzählt, daß, als man zu Rom unter dem Papste Sixtus V (1586) den 9000 Centner schweren Obelisken aufstellen wollte, und er beinahe schon auf dem Untergestelle stand, die Stricke der Flaschenzüge zu lang waren. Der Baumeister Dominicus Fontana ließ sie benetzen, sie verkürzten sich, und zogen dadurch den Obelisken vollends in die Höhe.

Auch die in 4 beschriebenen Phänomene der Anziehung und Abstoßung, welche scheinbar mit den vorhergehenden gar keinen Zusammenhang haben, erklären sich durch die Capillarität. Anziehung findet nämlich nur zwischen 2 Körpern statt, welche entweder beide von dem Wasser benetzt oder nicht benetzt werden, Abstoßung nur dann, wenn der eine benetzt, der andere aber nicht benetzt wird. Bei den Korkkügelchen, welche von dem Wasser benetzt werden, wird das Wasser vermöge der Capillarität, an denjenigen

Digitized by Google

Seiten derselben, die einander zugekehrt sind, stärker in die Höhe gehoben, als an den Außenseiten, dadurch entsteht in ihrer Mitte zwischen ihnen gewissermaßen eine Vertiefung, nach welcher sie sich natürlich hinbewegen müssen. Bei den Wachskügelchen, welche nicht benetzt werden, wird die Flüssigkeit durch die Capillar-Depression nach Innen stärker niedergedrückt, als nach Außen. Es entsteht also auch hier eine Vertiefung, welche beide Kügelchen zu sich hinzieht. Aus gleichen Gründen erklärt sich auch die Erscheinung, daß ein Korkkügelchen, wenn es in die Nähe der Gefäßwand kommt, stark nach derselben hingezogen wird.

§. 24. **Fortsetzung; Endosmose, Exosmose.** 1) Füllt man eine unten mit einer Blase zugebundene Glasröhre mit einer concentrirten Lösung von Kupfervitriol, und taucht man dann die durch die Blase verschlossene Oeffnung in ein Gefäß mit Wasser, so fängt die Flüssigkeit in der Röhre allmählig an zu steigen, während sie in dem Gefäße sinkt. Dabei färbt sich das Wasser in dem Gefäße etwas blau. Man hätte die Röhre auch mit Weingeist füllen können. Wenn man in eine poröse Thonzelle Schwefelsäure gießt, und sie dann in ein Gefäß mit Wasser stellt, so findet eine ähnliche Erscheinung statt. 2) Hat man aber in die Röhre Wasser und in das Gefäß die Kupfervitriollösung gegossen, dann sinkt nach und nach die Flüssigkeit in der Röhre und steigt in dem Gefäße.

Aus den angeführten Beispielen zeigt sich, daß man Flüssigkeiten anwendet, welche sich mit einander mischen, also Adhäsion zu einander haben. Die Adhäsion kann aber nur bei unmittelbarer Berührung wirksam werden, und diese ist durch die Zwischenwand aufgehoben. Wenn auch die Thierblase porös ist, so sind doch die Poren so fein, daß sie den Flüssigkeiten keinen freien Durchgang durch sich gestatten (man kann kein Wasser oder eine andere Flüssigkeit durch Thierblase filtriren). Dagegen erklärt sich die Erscheinung, wenn wir annehmen, daß die Poren der Zwischenwand als Haarröhrchen wirken, und wenn wir bedenken, daß verschiedene Flüssigkeiten zu einem und demselben festen Körper eine verschiedene Adhäsion haben, also auch ein verschieden großes Bestreben, sich durch die Poren als Haarröhrchen zu bewegen. Nachdem Parrot im Jahr 1811 zuerst das wechselseitige Durchdringen des Weingeists und Wassers durch Thierblase beobachtet und bekannt gemacht hatte, war es besonders Dutrochet, welcher sich hauptsächlich mit diesen Erscheinungen beschäftigte. Er nannte die Erscheinung, wenn die Oberfläche der inneren Flüssigkeit sich erhob, Endosmose (ἔνδον, innen, ὠθω, bewegen), wenn sie dagegen sank, Exosmose (ἐξ, aus und ὠθω, bewegen). Da jedoch beide Erscheinungen ihrer Natur nach dieselben sind, und die Verschiedenheit nur dadurch bedingt ist, ob die Flüssigkeit, welche zur Zwischenwand eine größere Adhäsion hat, sich in dem äußeren oder inneren Gefäße befindet, so fängt man jetzt an, auch nur noch von einer Endosmose einer Flüssigkeit zu einer anderen zu reden. Daß übrigens auch die Adhäsion der beiden Flüssigkeiten zu einander von großer Bedeutung ist, und daß die Capillarität der Zwischenwand gewissermaßen nur die Vermittlung abgibt, durch welche das Bestreben beider Flüssigkeiten, sich zu mischen, befriedigt wird, geht daraus hervor, daß die Erscheinung in desto größerem Maße auftritt, je größer dieses Bestreben ist, daß aber das Steigen der einen Oberfläche ganz aufhört, sobald die Mischung in beiden Gefäßen gleich ist.

Digitized by Google

Auch bei der Ernährung der Pflanzen spielt die Endosmose eine wichtige Rolle, da sie die Absorption und Verbreitung der zur Nahrung dienenden Säfte vermittelt. Durch sie dringt das Wasser, welches in der Erde die Wurzelfasern der Pflanze umgibt, zu dem in den Zellen der Wurzelfasern enthaltenen Safte, dieser wird dadurch verdünnt, und geht dann in die benachbarten Zellen über, um auch hier die Säfte zu verdünnen, und gelangt so bis in die Spitzen der Zweige und Blätter.

§. 25. **Compressibilität, Elasticität.** Es könnte auffallend erscheinen, daß hier von der Compressibilität der tropfbaren Flüssigkeiten geredet werden soll, da diese doch in §. 10 als eine allgemeine Eigenschaft aller Körper angeführt worden ist. Allein wenn man die Zusammendrückung verschiedener Flüssigkeiten mit dem dort erwähnten Piezometer zu bewirken sucht, so zeigt sich als eine den tropfbaren Flüssigkeiten allein zukommende Eigenthümlichkeit, daß ihre Zusammendrückbarkeit in Vergleich zu den übrigen Körpern nur sehr gering ist, d. h. daß sehr bedeutende Kräfte angewandt werden müssen, um das Volumen derselben nur um ein Weniges zu vermindern. Aus Versuchen mit dem Piezometer geht zugleich hervor, daß die Zusammendrückbarkeit auch für verschiedene Flüssigkeiten verschieden ist. Von den bis jetzt untersuchten Körpern war sie für Schwefeläther am größten, für Quecksilber am kleinsten, etwa 16mal kleiner, als bei Wasser. Denken wir uns auf einer in einem Gefäße befindlichen Wassermasse eine Wassersäule von etwa 3300 Fuß Höhe ruhen, so wird das Gewicht dieser Säule doch nur im Stande sein, das Volumen des gedrückten Wassers um $\frac{1}{50}$ zu vermindern.

Bei dem Piezometer ist in dem sehr engen Halse desjenigen Gefäßes, in welchem sich die zusammenzudrückende Flüssigkeit befindet, diese von derjenigen Flüssigkeit, durch deren Druck die Compression bewirkt wird, durch einen Quecksilbertropfen getrennt. Der Quecksilbertropfen wird je nach der Größe der Compression mehr oder weniger in den Hals hinabgedrückt. Sobald aber der Druck wieder aufgehoben wird, steht man jedes Mal den Quecksilbertropfen auch wieder in die Höhe steigen und seinen früheren Stand einnehmen. Es geschieht dies offenbar nur dadurch, daß die in dem Gefäße befindliche Flüssigkeit sich wieder ausdehnt und ihr früheres Volumen einnimmt. Die tropfbaren Flüssigkeiten sind demnach auch elastisch. Ihre Elasticität unterscheidet sich aber wesentlich von derjenigen der festen Körper. Bei den letzteren war die Elasticität wirksam, sowohl wenn sie zusammengedrückt, als auch wenn sie ausgedehnt wurden. Jedes Mal sahen wir sie ihre frühere Gestalt und ihr früheres Volumen wieder einnehmen. Man schreibt ihnen deßwegen sowohl eine expansive, als auch eine attraktive Elasticität zu. Bei den Flüssigkeiten kennen wir dagegen nur die erstere. Es läßt sich freilich nicht mit Gewißheit behaupten, daß ihnen die attraktive Elasticität nicht auch zukomme, aber wir kennen bis jetzt kein dem Zuge bei festen Körpern ähnliches Mittel, dieselben auszudehnen.

C. Eigenschaften ausdehnsam flüssiger Körper.

§. 26. **Flüssigkeit, Ausdehnsamkeit, Luftpumpe.** Es ist schon früher bemerkt, daß die luftförmigen Körper mit den tropfbar flüssigen die Eigenschaft der Flüssigkeit gemein haben, und sich durch dieselbe von den festen Körpern unterscheiden. Auch ist gezeigt worden, daß es verschiedene

Digitized by Google

Grade der Flüssigkeit gibt, die sich unter Anderem auch an dem Widerstande erkennen lassen, welchen ein in einer Flüssigkeit sich bewegender fester Körper in ihr erfährt, da derselbe offenbar desto kleiner sein muß, je leichter sich die Theilchen des flüssigen Körpers verschieben lassen, d. h. je größer seine Flüssigkeit ist. Nun lehrt die Erfahrung, daß ein sich in einem luftförmigen Körper bewegender fester Körper weniger Widerstand erleidet, als wenn er sich in einem tropfbar flüssigen Körper befindet. Es folgt also daraus, daß den luftförmigen Körpern die Eigenschaft der Flüssigkeit noch in einem höheren Grade zugeschrieben werden muß, als den tropfbar flüssigen Körpern. Ferner ist schon früher erwähnt, daß beide Arten von Flüssigkeiten sich dadurch von einander unterscheiden, daß der einen die Tropfbarkeit, und der anderen die Ausdehnsamkeit oder das Bestreben, einen immer größeren Raum einzunehmen, als charakteristische Eigenschaft zukommt, sowie auch daß die Ausdehnsamkeit erklärt werden müsse durch das Ueberwiegen der abstoßenden vor der anziehenden Molecularkraft.

Auf die Ausdehnsamkeit gründet sich einer der wichtigsten physikalischen Apparate, die Luftpumpe. Sie wurde von Otto von Guerike, Bürgermeister zu Magdeburg, im Jahre 1650 erfunden, und hat den Zweck, aus einem abgesperrten Raume den möglichst größten Theil der eingeschlossenen Luft zu entfernen, d. h. die Luft in diesem Raum so viel als möglich zu verdünnen, zu evacuiren (evacuare, entleeren).

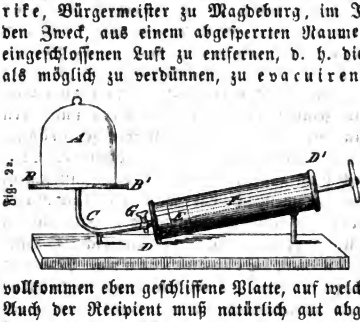


Fig. 2a.

In ihrer einfachsten Construction besteht sie aus folgenden Theilen: 1) dem Recipienten A (Fig. 2a), durch welchen der Raum abgesperrt wird, in welchem die Luft verdünnt werden soll; als solcher dient in der Regel eine Glasglocke. 2) Der Teller BB', eine kreisrunde, vollkommen eben geschliffene Platte, auf welcher der Recipient aufgesetzt wird. Auch der Recipient muß natürlich gut abgeschliffen sein, damit nicht die äußere Luft zwischen dem Teller und dem Recipienten stets wieder von Neuem in den Recipienten eindringen kann. 3) Die Verbindungsröhre C, eine dünne Röhre, welche durch die Mitte des Tellers hindurchgeht, und die Verbindung zwischen dem Recipienten und 4) dem Stiefel DD' herstellt. Der Stiefel ist ein weiter hohler Cylinder, gewöhnlich von Messing. In ihm befindet sich luftdicht schließend 5) der Kolben E, der 6) durch die Kolbenstange F in demselben auf und ab bewegt werden kann. Nahe dem Boden D des Stiefels geht durch die Verbindungsröhre 7) ein doppelt durchbohrter Hahn G, der Senguerd'sche Hahn, welcher, je nachdem er gestellt wird, die Verbindung zwischen dem Recipienten und dem Stiefel vermittelt, oder diese Verbindung aufhebt und dagegen eine Communication zwischen dem Stiefel und der äußeren Luft herstellt. Soll nun die Luft in dem Raume A verdünnt werden, so wird zunächst der Hahn so gestellt, daß A mit dem Stiefel durch die Verbindungsröhre communicirt, dann wird der Kolben bis nach D' in die Höhe gezogen, dadurch breitet sich die in A befindliche Luft vermöge ihrer Ausdehnsamkeit auch in den ganzen Stiefel aus. Nun wird durch Drehen des Hahns die

Digitized by Google

Communication zwischen dem Recipienten und dem Stiefel wieder aufgehoben, dagegen die Communication des Stiefels mit der äußeren Luft bewirkt. Wird nun der Kolben wieder niedergedrückt, so kann die in den Stiefel getretene Luft nicht zurück nach A, sondern entweicht durch den einen Kanal des Hahns in die äußere Luft. Figur 2b zeigt die Längsschnitte des Senguerd'schen Hahns für die beiden erwähnten Stellungen desselben. Die beschriebene Operation wird nun in derselben Aufeinanderfolge wiederholt, und demnach durch jeden neuen Niedergang des Kolbens ein Theil der noch in A zurückgebliebenen Luft entfernt. Was für ein Theil dies ist, richtet sich natürlich nach dem Verhältniß des Volumens des Stiefels zum Volumen des Recipienten. Daß dessenungeachtet in A nie ein luftleerer Raum hergestellt werden kann, geht schon daraus hervor, daß die Luft sich nie aus A ganz entfernt, und beim Aufziehen des Kolbens sich vermöge ihrer Ausdehnsamkeit nur gleichmäßig in den Recipienten, das Verbindungsrohr und den Stiefel ausbreiten kann. Bei jedem einzelnen Instrumente kann die Verdünnung der Luft nie über einen bestimmten Punkt hinaus getrieben werden. Daran ist namentlich die Größe des s. g. *schädlichen Raumes* Schuld. Man versteht darunter den Raum zwischen dem Hahn und dem Boden des Stiefels. Wenn nämlich durch den Niedergang des Kolbens die in dem Stiefel befindliche Luft in die äußere Luft getrieben ist, so bleibt der schädliche Raum mit Luft von der Dichte der äußeren Luft angefüllt; wird dann der Hahn gedreht, so gelangt diese durch denselben unter den Recipienten. Kann man nun auch den schädlichen Raum weniger schädlich machen dadurch, daß man den Hahn recht nahe an dem Boden des Stiefels anbringt, so läßt er sich doch nicht gänzlich beseitigen. Das Instrument ist vielfach vervollkommnet worden, namentlich hat man die Einrichtung getroffen, daß durch die Bewegung des Kolbens zugleich der Hahn mit in die jedes Mal nothwendige Stellung versetzt wird; so eingerichtete Luftpumpen nennt man *Luftpumpen mit Selbststeuerung*. Man hat auch den schädlichen Raum ganz vermeiden zu können geglaubt dadurch, daß man statt des Hahnes an der Mündung der Verbindungsröhre in den Boden des Stiefels ein *Blasenventil* (ein Ventil ist ein solcher Verschluß einer Oeffnung, der sich nur nach einer Seite hin öffnen läßt; Blasenventile, Kugelventile, Kegel- oder conische Ventile, Klappenventile) anbrachte, welches sich nur nach dem Stiefel zu öffnete. Damit dann die Luft bei dem Niedergang des Kolbens aus dem Stiefel entweichen konnte, wurde der Kolben durchbohrt, und die Oeffnung ebenfalls durch ein Blasenventil, das sich nur nach Oben öffnete, verschlossen. Die beiden Ventile vertreten also hier die beiden Durchbohrungen des Hahns. So eingerichtete Luftpumpen nennt man *Ventilluftpumpen*, während die oben beschriebenen *Hahnluftpumpen* heißen. Gegen die Construction der Ventilluftpumpen ist jedoch zu bemerken, daß, wenn die Verdünnung der Luft bis zu einem gewissen Grade vorgeschritten ist, die Luft nicht mehr im Stande ist, das Ventil am Boden des Stiefels zu heben.

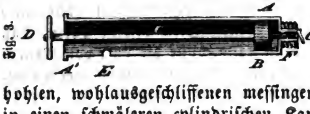
§. 27. Compressibilität, Elasticität; Compressionspumpe, Windbüchse, Heronsball, Heronsbrunnen. Man nehme einen am einen Ende geschlossenen, hohlen Cylinder, in welchen ein eng anschließender Kolben paßt, der sich luftdicht in demselben auf und ab bewegen läßt. Wird der

Digitized by Google

Kolben an dem offenen Ende eingesetzt, so kann man ihn fast bis auf den Boden des Cylinders niederdrücken. Sobald man aber den Druck auf den Kolben aufhebt, wird derselbe wieder nach Oben getrieben.

Der Cylinder ist offenbar, ehe der Kolben eingesetzt wird, mit Luft angefüllt. Da der Kolben luftdicht schließt, kann sie auch nicht aus dem Innern des Cylinders entweichen. Daraus also, daß sich dennoch der Kolben fast bis auf den Boden niederdrücken läßt, geht hervor, daß die Luft eine sehr bedeutende Zusammendrückbarkeit besitze. Das Resultat des Versuchs bleibt sich aber auch gleich, wenn der Cylinder vor dem Versuche mit einem anderen luftförmigen Körper gefüllt wurde. Diese große Zusammendrückbarkeit ist also eine allen luftförmigen Körpern gemeinsame Eigenschaft. Dasselbe gilt auch von den übrigen mechanischen Eigenschaften, in welchen die verschiedenen ausdehnsamen Körper sich höchstens dem Grade nach von einander unterscheiden. Aus diesem Grunde pflegt man denn auch diese Eigenschaften gewöhnlich nur von der Luft als dem bekanntesten und allgemein verbreitetsten Repräsentanten der ausdehnsam flüssigen Körper nachzuweisen. In §. 25 wurde von den tropfbar-flüssigen Körpern gezeigt, daß schon eine sehr bedeutende Kraft dazu gehöre, um das Volumen derselben nur um ein Geringes zu verkleinern, so daß man sie sogar lange Zeit für gänzlich unzusammendrückbar hielt. Wir begegnen also hier einem zweiten Unterschiede, durch welchen die beiden Arten von Flüssigkeiten charakterisirt werden.

Fig. 3.



Um luftförmige Körper in einen sehr comprimirten Zustand zu versetzen, dient die Compressionspumpe. Sie besteht gewöhnlich aus einem hohlen, wohlausgeschliffenen messingenen Cylinder AA' (Fig. 3), der bei A in einen schmäleren cylindrischen Kanal F, welcher nach Außen ein Schraubengewinde hat, endigt. Gegen das andere Ende hin ist in der Seitenwand eine kleine Oeffnung E angebracht. Im Innern befindet sich ein luftdicht schließender Kolben B, welcher durch die Kolbenstange C und den Handgriff D auf und ab bewegt werden kann. Am äußersten Ende von F endlich ist ein Ventil G angebracht, das sich nur nach Außen öffnet. Der Raum, in welchem die Luft verdichtet werden soll, wird bei F angeschraubt. Nun wird der Kolben bis über die Oeffnung E zurückgezogen. Die äußere Luft strömt durch E ein, und füllt das Innere des Cylinders an. Sobald aber jetzt der Kolben sich bis über E zurück bewegt hat, kann die Luft nicht mehr durch E entweichen, dagegen wird sie bei dem Niedergang des Kolbens durch das Ventil G in den angeschraubten Raum getrieben, und in demselben festgehalten, weil das Ventil den Rücktritt in den Cylinder verhindert. Durch jeden neuen Auf- und Niedergang des Kolbens wird auf diese Weise die Luft in dem angeschraubten Raume um eine neue Menge vermehrt, welche dem Volumen des Cylinders von E bis A entspricht. Für manche Zwecke ist es vortheilhaft, wenn sich bei F noch ein Teller aufschrauben läßt, auf welchen eine Glasglocke als Recipient aufgesetzt werden kann. Soll dann die Luft in der Glasglocke verdichtet werden, so muß diese luftdicht auf den Teller aufgeschraubt werden können.

In dem zweiten Theil unseres Versuchs ist bemerkt, daß, sobald der Druck auf den Kolben aufhört, er von selbst wieder zurückgetrieben wird.

Digitized by Google

Daraus ergibt sich, daß die luftförmigen Körper auch einen sehr bedeutenden Grad von Elasticität besitzen, besonders wenn man die Masse des Kolbens im Vergleich zur Masse der Luft, welche denselben in Bewegung setzt, in Erwägung zieht. Durch ihre bedeutende Elasticität unterscheiden sich also die luftförmigen Körper ebenso sehr von den tropfbar flüssigen, wie durch ihre bedeutende Compressibilität. Es ist dies der Grund, warum man ihnen auch wohl den Namen elastische Flüssigkeiten beigelegt hat. Auch bei den luftförmigen Körpern hat man keine attraktive, sondern nur eine expansive Elasticität nachgewiesen, und wird sie auch nicht nachweisen können, da der attraktiven Elasticität ihre Ausdehnsamkeit, die sie ja von allen übrigen Körpern wesentlich unterscheidet, entgegenwirkt, und sie wegen ihres Ueberwiegens gänzlich aufhebt.

Auf der Elasticität der Luft beruht die Wirkung der Windbüchsen. Bei ihnen ist der Kolben abschraubbar und hohl, muß jedoch sehr starke Wände haben. Nach dem Laufe zu hat er eine Oeffnung, welche durch ein Ventil, das sich nur nach dem Innern des Kolbens öffnet, verschlossen ist. Beim Gebrauch wird der Kolben ab- und an eine dazu gehörige Compressionspumpe angeschraubt. Die Luft wird nun in demselben bis zu einem hohen Grade verdichtet. Dann wird der Kolben wieder an die Büchse angeschraubt, und eine Kugel in den Lauf gebracht. Eine Vorrichtung, durch welche das Ventil geöffnet werden kann, steht mit dem Drücker so in Verbindung, daß beim Losdrücken das Ventil wirklich auf kurze Zeit geöffnet wird. Dadurch strömt ein Theil der comprimirten Luft in den Lauf, und treibt die Kugel fort. Ein Vortheil der Windbüchsen besteht darin, daß man mehrere Schüsse hinter einander thun kann, ohne die Luft von Neuem in dem Kolben comprimiren zu müssen. Die folgenden Schüsse werden indessen immer schwächer, weil die in dem Kolben zurückbleibende Luft immer weniger comprimirt wird. Der Gebrauch der Windbüchsen ist indeß fast überall polizeilich verboten, weil durch sie dadurch, daß ihnen der Blitz und der heftige Knall der gewöhnlichen Feuergewehre abgeht, die öffentliche Sicherheit leicht gefährdet werden könnte.

Auf der Elasticität der Luft beruht auch die Wirksamkeit des folgenden, von Heron in Alexandrien (210 v. Chr.) erfundenen Apparats. Der Heronsball besteht aus einem, öfter runden (woher der Name) Gefäße, durch welches ein Röhrchen luftdicht hindurchgeht. Das Röhrchen reicht fast bis auf den Boden des Gefäßes, und endigt außen in eine feine Spitze. Wenn man nun, nachdem der Ball zuvor etwa bis zur Hälfte mit Wasser gefüllt wurde, durch die Spitze noch Luft einbläst, so steigt diese durch das Wasser zur inneren Luft empor und comprimirt diese. Die innere Luft will sich vermöge ihrer Elasticität wieder ausdehnen, und drückt demnach auf ihre Umgebungen. Von diesen ist aber, da die übrigen Wände fest sind, nur das Wasser beweglich, welches daher auch durch die Röhre in die Höhe getrieben wird. Solche Heronsbälle sind die in den chemischen Laboratorien zum Ausüßen der Rückstände auf den Filtern gebräuchlichen Spritzflaschen. Ganz auf demselben Princip, wie der Heronsball, beruht der Heronsbrunnen; nur wird hier die Luft nicht durch Einblasen comprimirt, sondern mit dem eigentlichen Heronsball steht hier noch ein unteres Gefäß durch eine Röhre, welche fast bis an die obere Wand des Heronsballes reicht, in Verbindung, und die Compression geschieht dadurch, daß durch Eingießen

Digitized by Google

von Wasser in das untere Gefäß die darin befindliche Luft gezwungen wird, zu der Luft im Heronsball zu entweichen, und diese dadurch zu verdichten.

§. 28. **Gas, Dampf.** 1) Wenn man ein Gefäß, in welchem sich Wasser befindet, über das Feuer stellt, und mit einem Deckel bedeckt, so findet man, sobald man den Deckel, nachdem das Wasser in das Sieden gerathen ist, aufhebt, denselben ganz mit Wasser beschlagen. 2) Im Winter laufen in geheizten Zimmern die Fensterscheiben an, d. h. sie bedecken sich mit tropfbar flüssigem Wasser; ebenso Gläser, welche man aus dem Kalten in solche Zimmer bringt.

Durch das Feuer wird bekanntlich das Wasser in Wasserdampf, also in einen luftförmigen Körper verwandelt. Wenn nun das Gefäß, in welchem der Dampf entwickelt wird, mit einem Deckel bedeckt ist, so kann der gebildete Dampf nicht frei entweichen, und wird demnach durch den weiter gebildet werdenden immer mehr zusammengedrückt. Dadurch werden die Molecüle desselben immer mehr genähert, und so tritt ein Punkt ein, wo sie so nahe gebracht werden, daß die anziehende Molecularkraft der abstoßenden gleich wird, wo also der Dampf wieder in tropfbar flüssiges Wasser zurückverwandelt wird. Aber nicht allein durch Compression können die Molecüle eines Körpers einander genähert werden, sondern auch, wie die allgemeine Erfahrung zeigt, durch Abkühlung. Im Winter sind die Fensterscheiben eines geheizten Zimmers, da auf sie die äußere Kälte unmittelbar einwirkt, kälter, als die übrigen Stellen des Zimmers. In der Luft des Zimmers ist Wasserdampf verbreitet. Sobald dieser mit den kälteren Fensterscheiben in Berührung kommt, ziehen sich die Molecüle desselben zusammen, und es hat nun derselbe Vorgang statt, wie an dem Deckel des Gefäßes. Was hier von dem luftförmigen Wasser gezeigt ist, findet ebenso auch bei manchen anderen ausdehnsamen Flüssigkeiten statt, nämlich daß sie durch Compression oder Abkühlung in tropfbare Flüssigkeiten verwandelt werden, nur muß bei der einen der Grad der Compression oder der Abkühlung größer sein, als bei einer anderen. Bei anderen ausdehnsamen Flüssigkeiten sehen wir jedoch diese Erscheinungen nicht eintreten, wie z. B. bei der atmosphärischen Luft. Man unterscheidet hiernach zwei Arten von ausdehnsamen Flüssigkeiten, solche, welche durch die zwei genannten Mittel tropfbar flüssig werden können, und welche man *Dämpfe* nennt, und solche, bei welchen dies nicht der Fall ist, und welche *Gase* genannt werden. Diese Unterscheidung ist jedoch nicht streng durchzuführen, seitdem es *Faraday* gelungen ist, durch Anwendung von sehr starken Druckkräften und eine sehr bedeutende Temperaturerniedrigung eine Anzahl von Körpern, welche den Gasen beigezählt werden, tropfbar flüssig zu machen. Wenn dies noch nicht bei allen Gasen gelungen ist, so steht zu vermuthen, daß wir für sie noch nicht den nöthigen Druck oder die nöthige Abkühlung hervorbringen können. Solche Gase, welche nicht tropfbar flüssig gemacht werden können, nennt man *permanente Gase* (permanēre, bleiben). In die Klasse derselben gehören unter anderen die atmosphärische Luft, das Wasserstoffgas, das Stickstoffgas, das Sauerstoffgas. Man thut am besten, als Dämpfe diejenigen ausdehnsamen Körper zu bezeichnen, welche uns unter den gewöhnlichen Umständen als tropfbar flüssige Körper erscheinen.

§. 29. **Schwere, Druck.** 1) Man nehme einen Glasballon von nicht dickem Glase, der mit einer Messingfassung versehen ist, vermittelst welcher

Digitized by Google

er auf die Luftpumpe als Recipient aufgeschraubt werden kann, und durch welche ein Hahn geht, durch den die Communication mit der äußeren Luft abgesperrt werden kann, verdünne die Luft in dem Ballon so weit, als möglich, hänge ihn dann an den einen Arm des Wagbalkens einer empfindlichen Wage auf und bringe die Wage durch Auflegen von Gewichten auf der anderen Seite in das Gleichgewicht. Wird dann der Hahn geöffnet, so daß die äußere Luft einströmen, und den Ballon anfüllen kann, so ist das Gleichgewicht gestört, die Seite, auf welcher der Ballon hängt, senkt sich. Das Gleichgewicht kann erst dadurch wieder hergestellt werden, daß auf der anderen Seite noch Gewichte zugelegt werden. Dasselbe findet statt, wenn man den Ballon nach Oeffnung des Hahns mit irgend einer anderen ausdehnsamen Flüssigkeit anfüllt. 2) Eine ungefähr 30 Zoll lange Röhre, welche an dem einen Ende einen luftdichten Verschluß hat (etwa durch einen gut schließenden Kork), fülle man ganz mit Queckſilber an, schließe das offene Ende mit dem Finger, kehre hierauf die Röhre um, bringe das zugehaltene offene Ende unter die Oberfläche des Queckſilbers in einem weiteren Gefäße, und ziehe nun den Finger weg. Man wird finden, daß zwar das Queckſilber in der Röhre fällt, aber doch noch etwa 28 Par. Zoll über der Oberfläche des Queckſilbers in dem weiteren Gefäße in derſelben stehen bleibt. Wird hierauf der Verschluß am oberen Ende weggenommen, so fällt das Queckſilber so lange, bis es in der Röhre nicht höher steht, als in dem weiteren Gefäße. Der hier angegebene Verſuch iſt zuerſt im Jahre 1643 von Evangeliſta Toricelli, einem Schüler Galilei's, zu Florenz angeſtellt worden, und heißt nach ihm der Toricelli'ſche Verſuch.

Aus dem erſten der angegebenen Verſuche erſehen wir, daß die luftförmigen Körper trotz ihrer Ausdehnſamkeit unter gegebenen Verhältniſſen wirklich das Beſtreben zeigen, nach der Erde hin zu fallen, d. h. daß ſie ebenſo, wie die übrigen Körper, der Schwere unterworfen ſind. Die Schwere wurde zwar oben ſchon (§. 11) als allgemeine Eigenſchaft aller Körper hingeſtellt, da man aber bei den ausdehnſam flüſſigen Körpern das Beſtreben zu fallen unter den gewöhnlichen Verhältniſſen wegen ihres Beſtrebens, einen immer größeren Raum einzunehmen, nicht wahrnimmt, ſo mußte es hier noch beſonders nachgewieſen werden. Daß die Luft ſchwer iſt, läßt ſich freilich ſchon daraus ſchließen, daß ſie an der Oberfläche unſerer Erde feſtgehalten wird, und um dieſelbe die Atmoſphäre (ἀτμός, Dunſt, und σφαῖρα, Kugel; irrthümlich im Deutſchen mit Dunſtkreis überſetzt) bildet; denn ohne die Schwere hätte ihre Ausdehnſamkeit ſie ſchon längſt von der Erde weg in den Weltenraum verbreiten müſſen.

Bei dem Toricelli'ſchen Verſuche fragt es ſich zunächſt, warum nicht das Queckſilber ganz aus der Röhre herunterfalle, ſondern noch ungefähr 28 Zoll hoch in derſelben ſtehen bleibe. Bei der leichten Verſchiebbarkeit der Theilchen einer tropfbaren Flüſſigkeit muß der geringſte Druck eine Bewegung hervorbringen, es ſei denn, daß die gedrückten Theilchen von allen Seiten und nach allen Richtungen einen ebenſo großen Druck erleiden. Ein Zuſtand der Ruhe kann alſo in einer Flüſſigkeit nur dann eintreten, wenn alle Theilchen derſelben nach allen Seiten hin gleich ſtark gedrückt werden. Das Queckſilber, das in der Röhre über der Oberfläche in dem weiteren Gefäße ſtehen bleibt, drückt aber die Theile dieſer Oberfläche, über welchen es ſteht, mit ſeinem ganzen Gewichte; da nun deſſenungeachtet das Queck-

Digitized by Google

silber in dem Gefäße in Ruhe ist, so müssen auch die übrigen Theile der Oberfläche ebenso stark gedrückt werden. Ueber diesen ruht aber nur die Luft, der Druck, den sie erleiden, kann also nur von der Luft herrühren. Die luftförmigen Körper haben hiernach auch das mit den übrigen Körpern gemein, daß sie in Folge der Schwere auf jede Unterlage, die sie am Fallen hindert, ihr Bestreben zu fallen durch einen auf die Unterlage ausgeübten Druck zu erkennen geben. Der Toricelli'sche Versuch lehrt uns aber nicht nur im Allgemeinen, daß die Luft drückt, sondern er gibt uns auch ein Mittel an die Hand, die Größe dieses Druckes genau zu bestimmen, da offenbar jede Stelle von der über ihr stehenden atmosphärischen Luft ebenso stark gedrückt wird, als ob über dieser Stelle eine 28 Zoll hohe Quecksilbersäule ruhte (Atmosphärendruck).

Die gegebene Erklärung wird auch noch bestätigt durch den letzten Theil des Versuchs. Wir sahen nämlich, daß, wenn die Röhre am oberen Ende geöffnet wird, das Quecksilber sogleich aus der ganzen Röhre niederfällt. Denn durch das Oeffnen tritt jetzt zu dem Drucke des Quecksilbers in der Röhre auch noch der Druck der über demselben befindlichen Luft. Die in der Röhre befindlichen Theile der Oberfläche des weiteren Gefäßes werden also stärker gedrückt, als die übrigen, über welchen nur die Luft steht, sie weichen demnach diesem stärkeren Drucke aus, und zwar so lange, bis sie sich wieder unter gleichem Drucke, wie die übrigen Theile der Oberfläche, befinden, d. h. bis alles Quecksilber aus der Röhre niedergefallen ist.

Da beim Füllen der Toricelli'schen Röhre alle Luft aus derselben durch das Quecksilber vertrieben wird, so ist demnach der Raum, welcher bei dem Umdrehen der Röhre durch das Fallen des Quecksilbers auf 28 Zoll entsteht, mit keinem materiellen Körper erfüllt, weßhalb er die Toricelli'sche Leere oder das Toricelli'sche Vacuum (vacuus, leer) genannt wird.

Wir haben also aus dem Toricelli'schen Versuche gesehen, daß der von der Luft ausgeübte Druck gar nicht unbedeutend ist, und doch hat man ihn bis zu Toricelli gar nicht gekannt. Auch uns macht er sich trotz seiner Größe unter gewöhnlichen Umständen gar nicht bemerklich. Die Ursache dieser anscheinend auffallenden Erscheinung liegt aber einfach darin, daß der Druck nicht allein nach einer einzigen Richtung ausgeübt wird, sondern nach allen Richtungen zu gleicher Zeit und mit gleicher Stärke. Daß dem wirklich so ist, geht deutlich aus folgenden mit der Luftpumpe anzustellenden Versuchen hervor: 1) Stellt man eine Glasglocke auf den Teller der Luftpumpe, und evacuirt, so läßt sich die Glocke nicht mehr von dem Teller abheben. Die Luft drückt von Außen, während der Gegendruck der inneren Luft desto mehr aufgehoben wird, je weiter die Verdünnung getrieben wird. Sobald man durch den Senguerd'schen Hahn wieder Luft unter die Glocke strömen läßt, sitzt auch die Glocke nicht mehr fest auf dem Teller. 2) Von zwei messingenen Halbkugeln, welche luftdicht auf einander passen, und äußerlich mit Handgriffen versehen sind, hat die eine einen Hahn, und läßt sich auf die Luftpumpe aufschrauben. Pumpt man dann aus der durch die zwei Halbkugeln gebildeten Hohlkugel die Luft aus, und verschließt den Hahn, ehe man sie von der Luftpumpe abnimmt, so lassen sich die Halbkugeln nur mit großer Gewalt aus einander reißen, einer Gewalt, welche natürlich desto größer sein muß, je größer der Durchmesser der Kugel ist. Der Apparat heißt die Magdeburger Halbkugeln, weil er von dem Erfinder der

Digitized by Google

Luftpumpe, dem Magdeburger Bürgermeister Guerike zuerst angegeben wurde (Auf dem Reichstage zu Regensburg im Jahre 1654 experimentirte Otto von Guerike vor dem Kaiser Ferdinand III. und den Reichsfürsten mit solchen Halbkugeln, welche ungefähr 1 Elle im Durchmesser hatten, und welche von 24 Pferden nicht aus einander gerissen werden konnten). 3) Man nehme einen hohlen, an beiden Enden offenen messingenen Cylinder, und überbinde entweder das obere Ende mit einer wohl angespannten, dünnen Membrane, oder überdecke es mit einer sorgfältig abgeschliffenen, dünnen Glasplatte, setze dann die Vorrichtung als Recipient auf den Teller der Luftpumpe, so wird schon nach einigen Kolbenzügen die Membrane oder die Glasplatte zersprengt werden. Ist die Membrane zu stark, so wird sie wenigstens, trotzdem daß sie straff angespannt war, stark eingedrückt werden. 4) Wird ein Glascylinder, dessen oberes Ende durch ein eingekittetes, nicht allzu dickes Stück Holz mit concaver Wölbung nach Außen luftdicht geschlossen ist, als Recipient benutzt, gießt man in die Wölbung Quecksilber, und evacuirt dann die Luft aus dem Innern des Cylinders, so wird das Quecksilber in feinen Tröpfchen durch das Holz hindurch gedrückt (Quecksilberregen).

Anmerkung. Es mögen hier noch nachträglich zwei Luftpumpen-Versuche angeführt werden, durch welche die Ausdehnsamkeit der Luft veranschaulicht wird. 1) Bringt man unter den Recipienten eine schlaffe, aber luftdicht zugebundene Blase, so schwillt diese, je mehr die Luft verdünnt wird, desto stärker auf. Sobald aber die Luft unter den Recipienten wieder zugelassen wird, sinkt sie wieder zusammen. Die sperrenden Wände der Blase sind nämlich, wenn der von Außen auf ihnen ruhende Luftdruck weggenommen wird, nicht mehr fest genug, um dem Bestreben der in der Blase befindlichen Luft, sich auszudehnen, zu widerstehen. 2) Der Heronsball fängt unter dem Recipienten der Luftpumpe, sobald die Luft verdünnt wird, von selbst an zu springen.

Fig. 4.

§. 30. **Fortsetzung; Barometer.** Läßt man die Toricelli'sche Vorrichtung längere Zeit stehen, oder stellt man den Toricelli'schen Versuch zu verschiedenen Zeiten an, so zeigt sich, daß die Quecksilbersäule in der Röhre nicht immer gleiche Höhe hat.

Es ergibt sich also hieraus, daß der Luftdruck sich nicht zu allen Zeiten gleich bleibt, sondern Veränderungen unterworfen ist, die zu messen der Toricelli'sche Apparat uns ein geeignetes Mittel an die Hand gibt. Zu diesem Zwecke gibt man ihm nur eine etwas bequemere und vollkommenere Einrichtung, und nennt ihn dann ein Barometer (βάρος, Schwere, μέτρον, Maß). An der Röhre befindet sich dann (Fig. 4.) eine Längeneintheilung, eine Scala (scala, Leiter, wegen der Aehnlichkeit), so daß man auf derselben unmittelbar die Höhe der Quecksilbersäule ablesen kann. Die Scala ist gewöhnlich nach dem alten französischen Maße in Par. Zoll und Linien getheilt, in neuerer Zeit bei Instrumenten, welche hauptsächlich zu wissenschaftlichen Untersuchungen bestimmt sind, oft nach dem Metermaß in Millimeter. Daß bei einer vorzunehmenden Messung Röhre und Scala eine verticale Lage haben müssen, wenn die Höhe richtig bestimmt werden soll, versteht sich von selbst. Das weitere Gefäß ist ge-

Digitized by Google

wöhnlich nicht von der Röhre getrennt, sondern beide sind mit einander verbunden. Man unterscheidet hauptsächlich zwei Arten von Barometern, Gefäßbarometer und Heberbarometer. Bei dem ersteren (Fig. 4) ist unten an der umgebogenen Röhre ein kugel- oder birnförmiges weiteres Gefäß, das natürlich offen sein muß, angeblasen; das letztere ist eine Röhre von überall gleicher Weite, und so umgebogen, daß die beiden Theile, von welchen der eine lang, der andere aber bedeutend kürzer ist, einander parallel laufen. Für den gewöhnlichen Gebrauch reichen erstere hin, für den wissenschaftlichen dagegen werden nur letztere verwandt. Bei den ersteren ist Scale und Röhre fest mit einander verbunden, der Nullpunkt der Scale entspricht dem mittleren Stand der Quecksilberoberfläche in dem weiteren Gefäße. Wenn nun das Quecksilber in der Röhre steigt oder fällt, so fällt oder steigt die Oberfläche in dem weiteren Gefäße, und der Nullpunkt ist demnach in beiden Fällen nicht mehr richtig. Die an der Scale abgelesene Höhe ist in dem ersten Falle zu klein, im zweiten zu groß, richtig nur bei dem mittleren Stande. Die Größe des hierdurch entstehenden Fehlers hängt von dem Verhältniß der Weite der Röhre zur Weite des Gefäßes ab; denn wäre z. B. das Gefäß 12mal so weit, als die Röhre, also der Querschnitt des Gefäßes 144mal größer, als der innere Querschnitt der Röhre und stiege das Quecksilber in der Röhre einen Zoll über seinen mittleren Stand, so fällt es in dem Gefäße natürlich nur um $\frac{1}{144}$ Zoll, und die abgelesene Höhe wäre demnach nur um $\frac{1}{12}$ Linie zu klein. Bei den Heberbarometern sind solche feste Scalen, deren Nullpunkt mit dem mittleren Stand des Quecksilbers im kürzeren, offenen Schenkel zusammenfällt, gar nicht denkbar, wenn die Höhe unmittelbar abgelesen werden soll, da der eben erwähnte Fehler viel zu bedeutend sein würde. Man macht daher entweder die Scale an der Röhre verschiebbar, oder die Röhre an der Scale. Dadurch wird es möglich, vor jedem Versuche den Nullpunkt genau in gleiche Höhe mit dem Stand des Quecksilbers in dem kürzeren Schenkel zu bringen. Will man auch bei Heberbarometern Scale und Röhre fest mit einander verbinden, so muß man den Nullpunkt an eine Stelle legen, welche weder das Quecksilber in dem langen, noch das in dem kurzen Schenkel jemals erreicht, und von diesem Nullpunkt sowohl nach Oben, als auch nach Unten eine Eintheilung machen. Es sind aber alsdann stets zwei Ablesungen nöthig, nämlich wie tief das Quecksilber in dem kürzeren Schenkel unter dem Nullpunkt, und wie hoch es in dem anderen über demselben steht; beide, zu einander addirt, geben dann die eigentliche Barometerhöhe. Es leuchtet ein, daß man den Gefäßbarometern ebenfalls eine bewegliche Scale geben, und dadurch den gerügten Fehler vollständig aufheben könnte. Sie leiden aber noch an einem zweiten Fehler, an dem nämlich, daß die Capillar-Depression (vergl. §. 23) in der Röhre größer ist, als in dem Gefäße, und also durch letztere nicht ganz aufgehoben werden kann, so daß der Barometerstand stets etwas zu niedrig gefunden wird. Wegen der gleichen Weite der beiden Schenkel des Heberbarometers ist derselbe auch von diesem Fehler frei.

An ein gutes Barometer müssen auch noch folgende Bedingungen gestellt werden: 1) das Quecksilber, welches zur Füllung verwandt wird, muß chemisch rein sein. Dem theuren Quecksilber ist in dem Handel aus betrügerischer Absicht öfter Blei, das einen weit niedrigeren Preis hat, beige-

Digitized by Google

mischt. Da nun Blei ein etwas geringeres specifisches Gewicht (11,44), als das Queckſilber (13,55) hat, ſo wird ein mit Blei verunreinigtes Queckſilber einen um ſo höheren Stand zeigen, je mehr Blei ihm beigemiſcht iſt, ganz abgeſehen davon, daß das unreine Queckſilber auch mehr oder weniger an dem Glaſe adhärirt. 2) Das Toricelli'ſche Vacuum muß wirklich vollkommen luftleer ſein; anderen Falls drückt die darin befindliche Luft auf das Queckſilber, wodurch dieſes einen zu niedrigen Stand erhält. Ob dieſe Bedingung erfüllt iſt, kann man daraus erſehen, daß das Queckſilber bei vorſichtigem Neigen des Barometers die Röhre vollſtändig ausfüllt. An den Wänden der Glasröhre adhärirt Luft, und auch das Queckſilber hat Luft abſorbirt. Wird nun bei Anfertigung des Barometers nicht für Fortſchaffung dieſer Luft geſorgt, ſo ſteigt ſie vermöge ihres geringeren ſpecifiſchen Gewichts in das Vacuum auf. Man verhindert dies und treibt die Luft gleich bei der Anfertigung aus, indem man das Queckſilber unmittelbar nach der Füllung in der Röhre ſelbſt über Kohlenfeuer auskocht. 3) Die Barometerröhren dürfen nicht zu eng ſein, denn zu enge Röhren machen das Barometer unempfindlich, indem der Reibungswiderſtand des Queckſilbers an den Röhrenwänden ſo bedeutend wird, daß geringe Veränderungen in dem Luftdruck ihn nicht überwältigen können, und dadurch unbemerkt bleiben.

Das Barometer hat bekanntlich außer den phyſikaliſchen Kabinetten noch unter dem Namen Wetterglas eine ſehr große Verbreitung gefunden. Man glaubt nämlich aus dem Steigen oder Fallen deſſelben einen Schluß auf die bevorſtehende Witterung machen zu können. Die nördlichen und öſtlichen Winde führen uns kältere und dichtere Luft zu, dieſe kann einen größeren Druck ausüben, das Barometer ſteigt alſo. Weil dieſe Luft aber weither nur über Land geſtrichen iſt, ſo enthält ſie verhältnißmäßig wenig Waſſerdämpfe, und wir haben daher bei nördlichen und öſtlichen Winden in der Regel heiteres, trocknes Wetter. Umgekehrt iſt es bei den ſüdlichen und weſtlichen Winden, dieſe führen uns wärmere und deßwegen leichtere Luft zu, das Barometer fällt. Die Luft kommt über das Meer zu uns, und enthält dadurch viele Waſſerdämpfe, welche bei dem Eintritt in unſere kältere Luft condenſirt werden, weßwegen ſie für uns gewöhnlich von trübem und regneriſchem Wetter begleitet iſt. Es erhellt hieraus, daß das Steigen und Fallen des Barometers allerdings mit den Veränderungen der Witterung in Verbindung ſteht, ohne daß ſichere Schlüſſe auf bevorſtehende Witterung darauf zu bauen wären. Mit einiger Wahrſcheinlichkeit kann man bei gutem Wetter und hohem Barometerſtand, wenn das Barometer langſam, aber anhaltend ſinkt, auf den baldigen Eintritt ſchlechten Wetters, und bei ſchlechtem Wetter und niedrigem Barometerſtand, wenn das Barometer langſam und anhaltend ſteigt, auf den baldigen Eintritt heiteren Wetters ſchließen.

Heberbarometer, bei welchen der längere Schenkel nur ungefähr ſechs Zoll lang iſt, und bei denen demnach von einem Vacuum gar keine Rede ſein kann, nennt man Barometerproben. Man bedient ſich derſelben, um den Grad der Verdünnung unter den Recipienten der Luftpumpen zu meſſen. Je verdünnter die Luft iſt, eine deſto kleinere Queckſilberſäule iſt ſie natürlich zu tragen im Stande. Bei einigermaßen guten Luftpumpen kann die Verdünnung ſoweit getrieben werden, daß das Queckſilber im ver-

Digitized by Google

schlossenen Schenkel der Barometerprobe nur um eine Linie höher steht, als im offenen.

Daß der Luftdruck veränderlich ist, und folglich die Höhe des Barometerstandes Schwankungen unterliegt, ist schon bemerkt. Es soll hier kurz angeführt werden, was uns zahlreiche Beobachtungen über diese Schwankungen lehren. Sie lassen sich eintheilen in regelmäßige, periodisch wiederkehrende (Variationen) und unregelmäßige. Die Beobachtungen unter den Wendekreisen zeigen uns, daß das Barometer täglich, also innerhalb 24 Stunden, 2mal einen höchsten, und 2mal einen tiefsten Stand hat. Die maxima werden Morgens und Abends, die minima nach Mittag und nach Mitternacht beobachtet. Bei uns und in noch höheren Breiten lassen sich diese täglichen Variationen an den Beobachtungen einzelner Tage nicht nachweisen, und die Frage, ob sie dennoch vorhanden sind, läßt sich nur dadurch entscheiden, daß man eine lange Zeit hindurch täglich zu verschiedenen Stunden des Tages das Barometer beobachtet, und aus diesen Beobachtungen die Mittelzahlen zieht. Schon die monatlichen Mittel, noch viel mehr aber die Jahresmittel weisen auch bei uns 2 tägliche maxima und 2 minima nach, welche ebenfalls in die entsprechenden Tageszeiten (Morgens 9 Uhr und Abends zwischen 9 und 11 Uhr; Nachmittags zwischen 3 und 5 Uhr und Morgens gegen 4 Uhr) fallen. Vergleicht man die Größe dieser täglichen Schwankungen in der Nähe des Aequators und bei uns, so zeigt sich, daß sie am Aequator am bedeutendsten sind, und je weiter nach Norden, desto mehr abnehmen. Der Grund hiefür sowohl, als auch für die Erscheinung, daß die täglichen Variationen bei uns nur durch die Mittel aus längeren Zeiten nachgewiesen werden können, liegt in dem Umstande, daß bei uns die unregelmäßigen Schwankungen viel bedeutender sind, als am Aequator, und dadurch die Variationen verdecken. Während sie sich am Aequator kaum innerhalb weniger Linien bewegen, haben sie bei uns schon einen Spielraum von 2 Zollen, und werden weiter nach Norden noch bedeutender. Sie sind auch nicht gleichmäßig über das Jahr vertheilt, sondern sind im Winter größer, als im Sommer. Unter den Wendekreisen läßt sich außerdem auch noch eine jährliche Periode nachweisen, indem der mittlere monatliche Barometerstand im Januar am größten ist, und von da an beständig bis zum Juli sinkt, vom Juli aber bis zum Januar wieder steigt. Auch von dieser jährlichen Periode ist bei uns nur so viel übrig geblieben, daß auch bei uns der mittlere Barometerstand im Winter höher ist, als in den übrigen Jahreszeiten, sonst aber keine besondere Regelmäßigkeit darbietet. Die in den heißen Ländern deutlich auftretende sowohl tägliche, als jährliche Periode der Barometerschwankungen zeigt unverkennbar, daß diese Schwankungen in inniger Beziehung zu den Temperaturverhältnissen stehen.

§. 31. **Fortsetzung; Pumpen, Feuerspritzen.** Nimmt man bei dem Toricelli'schen Versuch zur Füllung der Röhre Wasser statt Quecksilber, so wird das Wasser nach der Umkehrung der Röhre gar nicht fallen, sondern stets die ganze Röhre erfüllt halten. Dasselbe geschieht auch noch dann, wenn man statt einer 30 Zoll langen eine viel längere Röhre nimmt.

Diese Erscheinung erklärt sich einfach aus dem verschiedenen specifischen Gewichte von Quecksilber (13,55) und Wasser (1,00). Eine Quecksilbersäule von 28 Zoll Höhe wiegt 13,55mal so viel, als eine ebenso hohe Wasser-

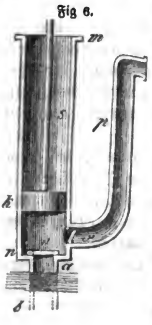
Digitized by Google

säule, und übt demnach unter gleichen Umständen auch einen 13,55mal größeren Druck auf eine Unterlage aus. Wenn also eine 28 Zoll hohe Quecksilbersäule erforderlich ist, um dem Druck der Atmosphäre das Gleichgewicht zu halten, so wird dasselbe erst von einer 13,55 × 28 Zoll oder einer etwas mehr als 31½ Fuß hohen Wassersäule geleistet werden. Denken wir uns über irgend einer Stelle der Oberfläche eines in einem offenen Behälter befindlichen Wassers einen luftleeren Raum, so wird der Luftdruck auf die übrige Oberfläche das Wasser in den luftleeren Raum etwa bis zu 32 Fuß Höhe in die Höhe heben; ist der Raum nicht absolut luftleer, sondern nur luftverdünnt, so wird die Höhe geringer ausfallen. Hierauf beruht die Wirksamkeit der Pumpen. Man unterscheidet Saugpumpen und Druckpumpen.

Fig. 5.

Die Haupttheile einer Saugpumpe (Fig. 5) sind: 1) eine in das Wasser hineinreichende Röhre ab, die Saugröhre; 2) diese steht mit einem weiteren hohlen Cylinder mn, dem Stiefel, in Verbindung; 3) da, wo die Saugröhre in den Stiefel mündet, ist ein Ventil v angebracht, welches sich nur nach dem Stiefel zu öffnet; 4) ein in der Mitte durchbrochener Kolben k, welcher sich vermittelst der Kolbenstange s luft- und wasserdicht an den inneren Wänden des Stiefels auf und ab bewegen läßt; 5) über der Oeffnung des Kolbens ist ein zweites Ventil v' angebracht, das sich ebenfalls nur nach Oben öffnet; 6) an dem oberen Theile des Stiefels die Ausgußröhre p. Im Zustande der Ruhe ist der Kolben auf dem Boden des Stiefels. Wird er nun in die Höhe gezogen, so entsteht unter ihm ein luftverdünnter Raum, die in der Saugröhre über dem Wasser befindliche Luft hebt daher das Ventil v, und breitet sich auch in den Stiefel aus. Dadurch wird die Luft auch in der Saugröhre verdünnt, der äußere Luftdruck hebt nun das Wasser in der Saugröhre in die Höhe, und es dringt durch das Ventil v in den Stiefel. Wird dann der Kolben niederbewegt, so schließt das in dem Stiefel befindliche Wasser durch sein Gewicht das Ventil v, und kann nicht mehr in die Saugröhre zurück. Sobald der Kolben in das in dem Stiefel befindliche Wasser niedergedrückt wird, kann dieses nur durch die Oeffnung in der Mitte des Kolbens ausweichen, es hebt daher das Ventil v', und tritt jetzt über den Kolben. Wird dann der Kolben wieder in die Höhe gehoben, so schließt das Wasser durch sein Gewicht das Ventil v', so daß es nicht mehr durch den Kolben zurückfließen kann, sondern mit demselben gehoben wird, bis es die Ausgußröhre p erreicht, und durch dieselbe abfließt. Das Spiel wiederholt sich bei jedem neuen Auf- und Niedergang des Kolbens.

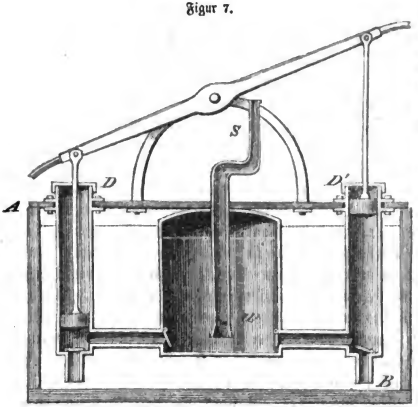
Fig 6.



Die Einrichtung einer Druckpumpe (Fig. 6) unterscheidet sich von derjenigen einer Saugpumpe in Folgendem: 1) der Kolben k ist nicht durchbrochen; 2) statt der Ausgußröhre an dem oberen Theile des Stiefels ist in der Nähe des Bodens desselben die Steigröhre p angebracht; 3) das zweite Ventil v' schließt die Verbindung der Steigröhre mit dem Stiefel, und öffnet sich nur

nach der Steigröhre zu. Bei dem Aufgang des Kolbens findet derselbe Vorgang statt, wie bei der Saugpumpe; bei dem Niedergang dagegen kann jetzt das Wasser nur durch das Ventil v' in die Steigröhre entweichen, und dann, weil es durch sein Gewicht das Ventil v' schließt, nicht mehr in den Stiefel zurückfließen. Durch jeden neuen Niedergang des Kolbens wird eine neue Portion Wasser in die Steigröhre gedrückt, bis das Wasser sie ganz ausfüllt und oben ausfließt *).

Figur 7.



Hier mögen auch noch mit wenigen Worten die Feuerspritzen erwähnt werden. In einem mit Wasser gefüllten Kasten AB (Fig. 7) befindet sich eine Verbindung zweier Druckpumpen D und D' mit einem großen Heronsball, dem Windkessel W, indem die beiden Steigröhren der Druckpumpen in den Windkessel münden. Die fast bis auf den Boden des Windkessels gehende Röhre S, durch welche das Wasser in die Höhe getrieben werden soll, heißt der Schwanenhals. Soll der Schwanenhals nicht gebraucht werden, dann wird nahe an dem Boden des Windkessels ein Schlauch angeschraubt, in welchen dann das Wasser durch den Druck der im Windkessel comprimirten Luft hineingetrieben wird. Die beiden Kolbenstangen sind an den 2 Armen eines langen Hebels, durch welchen sie in Bewegung gesetzt werden, so angebracht, daß stets der eine Kolben niedergeht, während der andere in die Höhe gezogen wird. Dadurch wird es ermöglicht, daß das Wasser nicht stoßweise aus dem Schwanenhalse oder dem Schlauche getrieben wird, sondern in einem constanten Strahle ausfließt.

§. 32. **Fortsetzung; Heber, unterbrochener Heber, Stechheber.** Wenn man eine gekrümmte, oder unter einem Winkel gebogene Röhre nimmt, deren einer Schenkel länger ist, als der andere, taucht den kürzeren Schenkel in eine Flüssigkeit, und saugt durch die andere Oeffnung die Luft aus der Röhre, so füllt sich die Röhre und die Flüssigkeit fließt so lange durch die Oeffnung des längeren Schenkels aus, als die Oeffnung des kürzeren sich

*) Seit Aristoteles erklärte man das Aufsteigen des Wassers in den Saugröhren aus einem Abscheu der Natur vor dem leeren Raum (horror vacui). Als ein Gärtner in Florenz zu Galilei's Zeiten eine sehr genau gearbeitete Wasserpumpe gemacht hatte, das Wasser aber dessenungeachtet nicht über 32 Par. Fuß steigen wollte, und Galilei um die Ursache dieser Erscheinung gefragt wurde, glaubte derselbe, der Abscheu der Natur gegen den leeren Raum habe seine Grenzen. Erst durch seinen Schüler Toricelli wurde die wahre Ursache der Erscheinung bekannt.

Digitized by Google

noch unter der Oberfläche der Flüssigkeit befindet, und als das Ende des längeren Schenkels tiefer liegt, als diese Oberfläche. Eine solche Röhre nennt man einen Heber (Saugheber), und bedient sich desselben zur Entfernung einer Flüssigkeit aus einem Gefäße, wenn letzteres nicht bewegt werden soll.

Daß der äußere Luftdruck es ist, welcher bei dem Aussaugen der Luft aus dem Heber die Flüssigkeit in denselben hineintreibt, daß also hier ganz derselbe Vorgang stattfindet, wie bei dem Steigen des Wassers in die Saugröhren der Pumpen, ist klar, und nur das fortdauernde Ausfließen der Flüssigkeit aus dem längeren Schenkel bedarf noch der Erklärung.

Fig. 8.

In dem Querschnitt des Hebers bei b (Fig. 8), welcher in derselben Horizontalebene mit der Oberfläche mn der Flüssigkeit in dem Gefäße liegt, wird die Flüssigkeit nach a mit einem Atmosphärendruck gedrückt. Ebenso hat die Flüssigkeit im Heber bei c nach a zu einen Atmosphärendruck zu erleiden. Beide sind zwar nicht ganz genau einander gleich, weil die Luftsäule bis c höher ist, als diejenige bis b, aber bei dem geringen specifischen Gewichte der Luft (sie ist 770mal leichter, als Wasser) können sie doch ohne merklichen Fehler als gleich groß angenommen werden. Dem Drucke bei b wirkt die Wassersäule ab, und dem Drucke bei c die Wassersäule ac entgegen. Da aber erstere ein geringeres Gewicht hat, als letztere, und also auch einen kleineren Theil von dem bei b stattfindenden Drucke nach a aufzuheben vermag, als dies die letztere in Beziehung auf den bei c stattfindenden Druck thun kann, so bekommt der Druck bei b das Uebergewicht über den bei c, und es erfolgt demnach eine Bewegung des Wassers in der Richtung bac. Aus dieser Erklärung ersieht man auch den Grund, warum, wenn der Heber wirksam sein soll, c stets tiefer liegen muß, als die Oberfläche der Flüssigkeit in dem Gefäße; ferner warum die Flüssigkeit mit desto größerer Geschwindigkeit ausfließt, je tiefer c unter diese Oberfläche zu liegen kommt.

Wenn der Heber für Flüssigkeiten benutzt werden soll, welche schädlich auf unseren Körper einwirken, wie z. B. für Schwefelsäure, so würde das Ansaugen bei c gefährlich sein, da man nicht immer verhindern kann, daß nicht etwas Flüssigkeit in den Mund gelangt. In solchen Fällen pflegt man nahe am unteren Ende des längeren Schenkels eine eigene nach Oben gebogene Saugröhre anzubringen (Giftheber). Beim Ansaugen muß dann natürlich das untere Ende des längeren Schenkels zugehalten werden.

Auf dem Principe des Hebers beruht auch die unter dem Namen des Verirbechers oder Tantalusbechers bekannte Spielerei, welche aus einem Gefäße mit einem versteckt angebrachten Heber besteht. Aus einem solchen Gefäße fließt natürlich die Flüssigkeit nicht aus, so lange ihre Oberfläche niedriger ist, als die höchste Stelle des Hebers. Ist dagegen die Flüssigkeit so hoch gestiegen, daß sich der Heber ganz gefüllt hat, so wird, wenn der kürzere Heberschenkel bis auf den Boden des Gefäßes reicht, das Gefäß ganz geleert. Die in der Natur vorkommenden periodisch fließenden Quellen sind vielleicht die Ausflüsse solcher von der Natur selbst gemachten Verirbecher.

Man nehme einen oben geschlossenen Cylinder von Glas, der unten

Digitized by Google

mit einem messingenen Boden versehen ist, durch welchen 2 ungleich lange Röhren hindurch gehen. Die kürzere, in eine Spitze auslaufende ragt nur wenig über den Boden hervor, die längere hat ihre Mündung in dem Boden. Nachdem man den messingenen Boden abgeschraubt hat, gieße man in den Cylinder so viel Wasser, daß es beim Umkehren die längere Röhre, welche man Anfangs zuhält, ausfüllt, und noch ein Theil im Cylinder bis zu geringer Höhe stehen bleibt. Man steckt die kürzere Röhre in ein Gefäß mit Wasser, und öffnet die längere Röhre. Es fließt dann das Wasser durch die längere Röhre aus, während durch die kürzere das Wasser aus dem Gefäße in den Cylinder in die Höhe springt. Durch das aus dem längeren Rohre ausfließende Wasser wird nämlich die Luft in dem Cylinder in einen größeren Raum ausgedehnt und dadurch verdünnt. Sie kann nun dem Drucke der äußeren Luft auf die Oberfläche des Gefäßes nicht mehr das Gleichgewicht halten, und deßhalb wird durch den größeren Druck das Wasser in der kürzeren Röhre in die Höhe getrieben. Man hat hier also einen Heber, welcher durch einen luftverdünnten Raum unterbrochen ist. Der Apparat heißt deßhalb auch der unterbrochene Heber.

Einfacher, als die beiden vorangegangenen Heber, ist der s. g. Stechheber. Es ist dies eine beiderseits offene Röhre, welche unten eine feine Oeffnung hat, und sich nach Oben bauchig erweitert, während doch die obere Oeffnung nicht weiter sein darf, als daß man sie bequem mit dem Daumen verschließen kann. Taucht man sie mit ihrem unteren Ende in ein Gefäß mit Flüssigkeit, und saugt am obern Ende die Luft aus, so füllt sie sich mit der Flüssigkeit. Verschließt man dann die obere Oeffnung mit dem Daumen, so kann man den Heber aus dem Gefäße herausheben, ohne daß die Flüssigkeit wieder zurückfließt. Will man die herausgehobene Flüssigkeit in einem anderen Gefäße ansammeln, so hält man den Heber über dasselbe und zieht den Daumen weg. Wenn sich die Flüssigkeit in einem tieferen Gefäße befindet, so wird das Ansaugen ganz entbehrlich. Denn dann taucht man den Heber tiefer in die Flüssigkeit ein, wodurch er sich so hoch füllt, als er eingetaucht ist. Wird nun die obere Oeffnung mit dem Daumen luftdicht verschlossen, so fließt zwar am Anfang ein wenig von der Flüssigkeit aus, das Ausfließen hört jedoch gleich wieder auf. Beim Ansaugen ist es offenbar der äußere Luftdruck, welcher die Flüssigkeit in den Heber hineintreibt, und dieser hält sie auch, nachdem der Heber aus dem Gefäße genommen ist, in demselben zurück, da er auf das untere offene Ende wirkt, während der Gegendruck von Oben durch das Verschließen mit dem Daumen weggeschafft wird. Sobald man durch das Wegziehen des Daumens die Luft auch von Oben drücken läßt, fließt deßhalb auch die Flüssigkeit aus. Im zweiten Fall, wo kein Ansaugen stattgefunden hat, ist die in dem oberen Theil des Hebers befindliche Luft, nachdem man die obere Oeffnung durch den Daumen verschlossen hat, ebenso dicht wie die äußere; sie hält ihr daher das Gleichgewicht, und die Flüssigkeit fällt etwas vermöge ihrer Schwere. Dadurch aber dehnt sich die innere Luft in einen größeren Raum aus, und wird verdünnt, so daß sie der äußeren Luft nicht mehr das Gleichgewicht halten kann, wodurch dann das weitere Ausfließen verhindert wird. Warum muß man beim Abzapfen der Fässer das Spundloch öffnen?

§. 33. Adhäsion, Mengung von 2 Gasen, Diffusion der Gase.

1) Wenn man ein Glas mit Wasser unter den Recipienten der Luftpumpe

bringt, und die Luft auspumpt, so sieht man nicht nur in dem Wasser Luftbläschen in die Höhe steigen, sondern auch an den Wänden des Glases. Dasselbe geschieht, wenn man ein Glas Wasser erwärmt, z. B. auf den geheizten Ofen stellt. Wenn man eine Glasröhre mit ausgekochtem Quecksilber, d. h. solchem, aus welchem durch das Auskochen die absorbirte Luft bereits vertrieben ist, füllt, und dann die gefüllte Glasröhre stark erhitzt, so bemerkt man ebenfalls an den inneren Wänden der Glasröhre Luftbläschen in die Höhe steigen. 2) Legt man auf eine frisch gereinigte Glasplatte ein Stück Metall, z. B. eine Münze, behaucht man sie, und wartet, bis die Glasplatte wieder spiegelnd blank erscheint, nimmt dann das Stück Metall weg, und behaucht die Glasplatte wieder, so wird die Stelle sichtbar, wo das Metall gelegen hat. Jede andere polirte Fläche verhält sich gerade so, wie die Glasplatte. 3) Wie es tropfbare Flüssigkeiten gibt, welche durch Mischung ein gleichförmiges Gemenge bilden (§. 22), so auch Gase, z. B. die atmosphärische Luft, welche in allen Schichten dem Volumen nach aus 21 Theilen Sauerstoffgas und 79 Theilen Stickstoffgas besteht, trotzdem daß beide Gase in ihrem specifischen Gewichte von einander verschieden sind, da, wenn das specifische Gewicht der atmosphärischen Luft = 1,00 gesetzt wird, das des Sauerstoffs 1,10 und das des Stickstoffs nur 0,97 ist. Füllt man einen Glascylinder mit Kohlensäure, welche ein specifisches Gewicht von 1,52 hat, und läßt ihn offen stehen, so ist nach einiger Zeit doch fast alle Kohlensäure in die leichtere atmosphärische Luft entwichen, und letztere in den Glascylinder eingedrungen. 4) Man verbindet 2 Ballons, von welchen der eine mit Wasserstoffgas, der andere mit kohlensaurem Gase gefüllt ist, durch eine Röhre, welche durch einen Hahn abgesperrt werden kann, stelle den Apparat so auf, daß der mit dem leichteren Gase gefüllte Ballon über dem anderen steht, und öffne dann den Hahn, so wird man nach einiger Zeit finden, daß die Hälfte des Wasserstoffgases in den unteren Ballon getreten ist, während die Hälfte des kohlensauren Gases in den oberen hinaufgestiegen ist. Beide Gase können auch durch eine poröse Scheidewand von einander getrennt sein, und doch geht der Austausch derselben durch die Scheidewand vor sich.

Wenn früher, wo von der Absorption die Rede war (§. 22.), schon gezeigt wurde, daß ausdehnsame Flüssigkeiten sowohl zu festen, als auch zu tropfbar flüssigen Körpern Adhäsion zeigen, indem sie in dem Inneren derselben verdichtet werden, so sehen wir hier in 1, daß ausdehnsame Flüssigkeiten auch an den Oberflächen der festen Körper adhäriren. Auch wurde schon bemerkt, daß durch die Adhäsion die Ausdehnsamkeit der Gase überwältigt werde. Dies ist aber nur dadurch möglich, daß durch die Adhäsion die Molecüle der Gase einander näher gebracht werden. Was demnach dieser Annäherung entgegenwirkt, muß auch der Adhäsion entgegenwirken, und bei hinreichender Stärke der Einwirkung sie aufheben. Nach §. 28 wirken aber der Annäherung der Molecüle hauptsächlich eine Verminderung des Drucks und eine Erhöhung der Temperatur entgegen, und beide sehen wir deßwegen hier die Adhäsion der Luft an das Glas aufheben. Auch der zweite Versuch lehrt uns eine Adhäsion gasförmiger Körper an die Oberfläche fester Körper. Die Glasplatte wird gereinigt, um die ihrer Oberfläche adhärirende Gasschicht zu entfernen. Die Stelle, auf welcher die Münze liegt, wird beim Behauchen vor der Berührung mit

Digitized by Google

Wasserdämpfen geschützt. An den übrigen Stellen condensiren sich zuerst die Wasserdämpfe zu tropfbarem Wasser, dieses nimmt aber schnell wieder Dampfgestalt an, so daß diese Stellen nur noch mit Wasserdampf in Berührung bleiben, der an ihnen adhärirt, während die Stelle, wo die Münze liegt, von adhärirendem Wasserdampfe frei bleibt. Es ist daher natürlich, daß bei dem zweiten Behauchen die Wasserdämpfe sich vorzugsweise an dieser Stelle condensiren, da die übrigen schon durch eine Schicht von Wasserdämpfen umhüllt sind. Aus 3 ersehen wir, daß durch die Adhäsion zwischen 2 Gasen derselbe Vorgang stattfindet, wie bei der Mischung zweier tropfbaren Flüssigkeiten. Während es aber tropfbare Flüssigkeiten gibt, welche nicht chemisch auf einander wirken, und nicht Adhäsion genug zu einander haben, um eine Mischung einzugehen (Oel und Wasser), kennt man nach der Erfahrung noch keine Gase, bei denen dies der Fall wäre, sondern stets verbreitet sich, wenn man in einen und denselben Raum verschiedene Gase bringt, welche keine chemische Verbindung mit einander eingehen, jedes derselben gleichförmig durch den ganzen Raum.

Aus den in 4 beschriebenen Versuchen endlich geht hervor, daß Gase ganz ähnliche Erscheinungen zeigen, wie diejenigen der Endosmose und Exosmose bei tropfbaren Flüssigkeiten (§. 24). Man hat ihnen aber für Gase einen eigenen Namen beigelegt, und nennt sie Erscheinungen der Diffusion der Gase (diffundere auseinandergießen, ausbreiten).

Zweiter Abschnitt.

Magnetismus.

§. 34. **Magnet, natürlicher, künstlicher.** Unter den verschiedenen Eisenerzen gibt es eins von grauschwarzer Farbe, welches vor allen übrigen durch folgende 2 Eigenschaften ausgezeichnet ist: 1) es zieht Eisen, Nickel, Kobalt (nach Faraday auch noch Titan, Mangan, Cerium, Chrom, Palladium und Platin) an; 2) im Zustande freier Beweglichkeit nimmt es stets eine bestimmte Richtung und Lage an. Auffallend und noch nicht erklärt ist dabei die Erscheinung, daß die Stärke der Anziehung weder durch die Größe, noch durch die Gestalt eines einzelnen Erzstückes bedingt ist; ein kleineres Stück zeigt oft eine viel bedeutendere Anziehung, als ein vielmal größeres. Das Erz ist aus Eisenoxydul und Eisenoxyd zusammengesetzt, und heißt Magneteisenstein oder Magnetstein (der Name soll von der in Lydien in Kleinasien liegenden Stadt Magnesia hergeleitet sein, in welcher die anziehende Kraft dieses Eisenerzes zuerst beobachtet worden sei). Auch ist ihm der Name natürlicher Magnet gegeben worden im Gegensatz zu den künstlichen Magneten. Während nämlich das erwähnte Erz die beiden Eigenschaften von Natur besitzt, lassen sich dieselben durch verschiedene künstliche Behandlungsarten, von welchen noch in der Folge die Rede sein wird, auch denjenigen Körpern mittheilen, auf welche der Magnetstein anziehend einwirkt. Da die Erscheinungen der natürlichen und künstlichen Magnete ganz dieselben sind, so wird im Folgenden nur

Digitized by Google

im Allgemeinen von den Magneten gesprochen werden. Unter dem Worte Magnetismus versteht man entweder: 1) den Inbegriff aller magnetischen Erscheinungen, oder 2) den Zustand der Körper, in welchem sie die magnetischen Erscheinungen zeigen, oder endlich 3) die Ursache, welche diese Erscheinungen bewirkt. Die ersten künstlichen Magnete soll der Engländer Savery im Jahre 1730 gemacht haben.

§. 35. **Magnetische und diamagnetische Körper.** Mit Rücksicht auf die Einwirkung eines Magnets theilt man die Körper in magnetische und diamagnetische. Magnetische Körper sind solche, auf welche der Magnet eine Anziehung ausübt, also die in dem vorhergehenden §. genannten. Alle übrigen heißen diamagnetische Körper. Auf sie übt der Magnet nach Faraday's wichtiger Entdeckung im Jahre 1845 auch eine Einwirkung aus, aber eine Einwirkung anderer Art, von welcher noch später gesprochen werden soll. Da man vor Faraday keine solche Einwirkung kannte, so nannte man sie früher unmagnetische Körper.

§. 36. **Pole, Indifferenzpunkt.** 1) Wenn man einen Magnet in Eisenfeilspäne legt, und dann wieder herausnimmt, so findet man, daß die Eisenfeilspäne sich hauptsächlich an 2 einander gegenüberliegenden Punkten angelegt haben, und daß an den übrigen Punkten desto weniger Eisenfeile hängen geblieben ist, je weiter diese Punkte von den obigen entfernt sind. 2) Wenn man die verschiedenen Punkte eines Magnets einem kleinen, eisernen, an einem Seidenfaden aufgehängten Kügelchen (dem magnetischen Pendel) nach und nach, aber immer in gleicher Entfernung, entgegenhält, so bemerkt man, daß 2 einander gegenüber liegende Punkte des Magnets das Kügelchen am stärksten aus seiner verticalen Lage ablenken, während man an allen andern Punkten, welche zwischen diesen liegen, eine geringere Ablenkung beobachtet, und der Punkt, welcher zwischen den beiden Punkten der stärksten Ablenkung in der Mitte liegt, gar keine Ablenkung des eisernen Kügelchens bewirkt.

Beide Versuche lehren, daß ein Magnet nicht an allen Stellen gleich stark anzieht. Die Punkte der stärksten Anziehung nennt man die Pole des Magnets. Sie befinden sich gewöhnlich an 2 einander entgegengesetzten Stellen der Oberfläche des Magnets und bei einem stabförmigen künstlichen Magnete an den beiden Enden desselben. Eine gerade Linie, welche beide Pole mit einander verbindet, wird die Axe oder Mittellinie und der Mittelpunkt der Mittellinie, an welchem eben die Anziehung gleich Null ist, der Indifferenzpunkt des Magnets genannt.

§. 37. **Die magnetische Anziehung wirkt durch andere Körper hindurch.** 1) Bringt man Eisenfeile auf Holz, Glas, Porcellan, Papier u. s. w., und hält dann den Magnet darunter, so bleibt die Einwirkung des Magnets auf die Feilspäne gerade so, wie ohne Anwendung eines Zwischenkörpers. Hält man einen solchen Zwischenkörper zwischen das magnetische Pendel und einen Magnet, so wird das Pendel ebenfalls abgelenkt. 2) Wendet man aber als Zwischenkörper ein Eisenblech an, so wird in beiden Fällen die Einwirkung des Magnets aufgehoben.

Der Magnet äußert also seine anziehende Kraft durch andere Körper hindurch, nur nicht durch solche, welche selbst von ihm angezogen werden. Im letzteren Falle wird die Anziehung entweder sehr geschwächt, oder hört auch ganz auf. Auch die Beschaffenheit der Luft als Zwischenkörper hat

Digitized by Google

auf die Anziehung des Eisens durch einen Magnet keinen Einfluß. Davon kann man sich überzeugen, wenn man das magnetische Pendel bald unter die Glocke der Luftpumpe bringt und die Luft evacuirt, bald unter die Glocke der Compressionspumpe und die Luft verdichtet. In beiden Fällen wird ein außerhalb der Glocke gehaltener Magnet das Kügelchen nach sich hinziehen, vorausgesetzt, daß die Entfernung des Magnets von dem Kügelchen nicht eine solche sei, in welcher auch in gewöhnlicher Luft keine Anziehung mehr stattfinden würde.

§. 38. **Die Anziehung zwischen einem Magnete und Eisen ist gegenseitig.** Hängt man einen Magnet auf, um ihn frei beweglich zu machen, und nähert ihm dann das Ende eines Eisenstabes, so sieht man den einen Pol des Magnets sich nach dem Eisenstabe hin bewegen.

Die Anziehung ist demnach gegenseitig, und wie der Magnet das Eisen anzieht, so wird er auch nach denselben Gesetzen von dem Eisen angezogen.

§. 39. **Abhängigkeit der magnetischen Wirkung von der Entfernung.** Hat man das magnetische Pendel durch einen genäherten Magnet aus seiner verticalen Lage abgelenkt, und entfernt dann den Magnet allmählig etwas weiter, so sieht man, daß die Größe der Ablenkung des Pendels rasch abnimmt.

Die Einwirkung der magnetischen Kraft wird also mit der Entfernung kleiner, und zwar, ganz wie bei den übrigen Kräften, im umgekehrten quadratischen Verhältniß der Entfernung. Der letzte Theil dieser Behauptung geht zwar nicht aus dem angeführten Versuche hervor, kann aber auf einem anderen Wege, wie später gezeigt werden wird, nachgewiesen werden (§. 57).

§. 40. **Magnetische Polarität, Magnetnadel.** Bringt man einen Magnet in den Zustand freier Beweglichkeit, so nimmt er, wie schon bemerkt, stets eine bestimmte Richtung an, und zwar ist diese von der Art, daß sich der eine Pol immer nach der nördlichen, der andere aber immer nach der südlichen Himmelsgegend wendet. Man nennt daher den ersteren Pol den Nordpol und den letzteren den Südpol des Magnets, und die Eigenschaft eines frei beweglichen Magnets, stets die Richtung von Nord nach Süd anzunehmen, seine magnetische Polarität.

Die Anziehungskraft des Magnets kannten schon die Alten, aber die Richtkraft desselben wurde in Europa wenigstens erst zwischen dem zwölften und vierzehnten Jahrhundert bekannt (Marco Polo). Um die magnetische Polarität oder die Richtkraft des Magnets zu zeigen, bedient man sich am besten der Magnetnadel. Es ist dies ein magnetisirtes Stahlstäbchen, das auf einer feinen Spitze ruht, um welche es sich frei herumdrehen kann. Um seine Beweglichkeit durch Verminderung der Reibung zu vermehren, ist es in der Regel in der Mitte durchbohrt und mit einem kleinen Agathütchen versehen. Die Pole der Magnetnadel liegen, wie bei allen stabförmigen Magneten, an den beiden Enden.

§. 41. **Verhalten zweier Magnete zu einander.** Wenn man einen frei beweglichen Magnet, also z. B. eine Magnetnadel, einem anderen Magnete, dessen Pole man kennt, nähert, so beobachtet man zwischen beiden bald eine Anziehung, bald eine Abstoßung.

Untersucht man die Erscheinung näher, so findet man, daß eine An-

Digitized by Google

ziehung stattfindet, so oft der Nordpol des einen Magnets dem Südpol des andern nahe kommt; daß dagegen eine Abstoßung eintritt, so oft die beiden Nordpole oder die beiden Südpole einander genähert werden. Ueber die gegenseitige Einwirkung zweier Magnete gilt daher das Gesetz: die gleichnamigen Pole stoßen sich ab, die ungleichnamigen ziehen sich an. Man nennt deßwegen auch wohl die ungleichnamigen Pole freundschaftliche, die gleichnamigen feindliche Pole.

Die angegebene Verschiedenheit bei der gegenseitigen Einwirkung zweier Magnete kann nicht durch dieselbe Ursache hervorgebracht werden; wir sind daher genöthigt anzunehmen, daß in jedem Magnete zwei verschiedene magnetische Kräfte vorhanden seien.

Das angeführte Gesetz gibt uns auch ein Mittel an die Hand, zu bestimmen, 1) ob ein Körper überhaupt ein Magnet sei, und 2) wo die Pole desselben liegen, und welcher Pol Nordpol und welcher Südpol ist. Es leuchtet ein, daß man bei beiden Bestimmungen einen sicheren Schluß nie aus der Anziehung, sondern nur aus der Abstoßung ziehen kann. Denn wenn ein Körper von einem Magnete angezogen wird, so kann daraus nur gefolgert werden, daß er zu denjenigen Körpern gehöre, auf welche der Magnet überhaupt einwirkt, und ebensowenig darf man aus dem Umstande, daß eine Stelle eines Magnets einen Pol eines beweglichen Magnets anzieht, schließen, daß diese Stelle der freundschaftliche Pol sei, da ja selbst der Indifferenzpunkt dieselbe Erscheinung zeigen muß.

§. 42. **Welche Wirkung bringt ein Magnet auf Eisen oder Stahl hervor, welche ihm genähert werden?** 1) Wenn man an einen Pol eines Magnets ein Stückchen Stahl oder weiches Eisen hängt, so wird sich an dieses leicht noch ein zweites, an das zweite ein drittes u. s. f. hängen. Untersucht man nun das erste Stückchen, nachdem man es von dem Magnete abgenommen hat, so findet man, daß es selbst magnetisch geworden ist. War es am Nordpol aufgehängt, so zeigt das Ende, mit welchem es an dem Nordpol hing, Südmagnetismus, das entgegengesetzte Ende aber Nordmagnetismus. Hing das Stückchen aber an dem Südpol des Magnets, so ist es umgekehrt. Ganz ähnlich verhalten sich die übrigen Stückchen. 2) Hängt man ein Stäbchen von Eisen oder Stahl an einem Faden auf, und nähert man ihm einen Magnetstab, so nimmt es sogleich eine bestimmte Lage gegen denselben an. Das eine Ende sucht sich ihm dabei zu nähern, und wird ein Nordpol, wenn ihm der Südpol des Magnets gegenübersteht, das abgewandte Ende dagegen wird ein Südpol. Beide Pole vermögen in diesem Zustande nun selbst wieder Eisenfeilspäne anzuziehen, und anderen entfernteren Stäbchen Polarität zu ertheilen.

Aus beiden Versuchen ergibt sich das Gesetz: Wenn man in die Nähe eines Magnetpols ein Stück Eisen oder Stahl bringt, so wird dieses selbst magnetisch, und zwar erhält das genäherte Ende den ungleichnamigen, das abgekehrte Ende den gleichnamigen Magnetismus. Auch muß die in den ersten §§. ausgesprochene Ansicht, als ob der Magnet gewöhnliches Eisen anziehe, dahin berichtigt werden, daß das Eisen durch die Annäherung des Magnets zunächst selbst magnetisch wird, und daß also eigentlich nur eine Anziehung zwischen den ungleichnamigen Polen zweier Magnete stattfindet.

§. 43. **Erklärung der vorhergehenden Erscheinung; Magnetisirung**

Digitized by Google

durch Vertheilung. Wenn man die Versuche des vorhergehenden §. noch so häufig mit demselben Magnete wiederholt, so zeigt derselbe doch keine Abnahme seiner magnetischen Kraft.

Wir schließen hieraus, daß der Magnet dem Eisen- oder Stahlstäbchen Nichts von seiner eigenen magnetischen Kraft abgibt, oder daß diese letzteren nicht durch Mittheilung magnetisch werden. Diese Ansicht wird auch noch dadurch unterstützt, daß die Eisen- oder Stahlstäbchen bei diesen Versuchen nie nur den gleichnamigen Magnetismus des genäherten Magnetpols erhalten, sondern daß stets beide Magnetismen zugleich in ihnen wirksam werden; sowie dadurch, daß die Stäbchen gerade an dem dem Magnetpole genäherten Ende den entgegengesetzten Magnetismus dieses Pols zeigen. Hat aber keine Mittheilung der magnetischen Kräfte an die Eisen- oder Stahlstäbchen stattgefunden, so müssen wir annehmen, daß dieselben schon in den Stäbchen vorhanden gewesen, wenngleich im unwirksamen Zustande. Da Nordmagnetismus und Südmagnetismus gewissermaßen entgegengesetzte Kräfte sind, indem ja der eine anzieht, was der andere abstößt, so müssen sie in den Stäbchen, um unwirksam sein zu können, sich überall das Gleichgewicht gehalten haben. Durch den genäherten Magnetpol wird dann dieses Gleichgewicht aufgehoben. Den ganzen Vorgang denkt man sich so: In den magnetischen Körpern sind zwei unwägbare Flüssigkeiten vorhanden, welchen die einander entgegengesetzten Kräfte des Nord- und Südmagnetismus zukommen. Die Theilchen der nördlichen Flüssigkeit stoßen sich unter einander eben so ab, wie die des südlichen Fluidums, während die zu verschiedenen Flüssigkeiten gehörenden Theilchen sich anziehen. Beide Flüssigkeiten lassen sich nicht isolirt darstellen, und haften nur an den Theilchen der des Magnetismus fähigen Körper. In einem unmagnetischen Eisen sind diese Flüssigkeiten gleichförmig in allen Molecülen vertheilt.

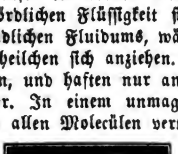


Fig. 9.

Sobald man nun den Nordpol N (Fig. 9) eines Magnets einem solchen Eisen nähert, wird in jedem Massentheilchen die Polarität auf gleiche Art, wie oben bei dem ganzen Stabe bewirkt. Jedes dem Nordpol zugewendete Ende eines Molecüls erhält einen Südpol s, jedes abgewendete Ende einen Nordpol n, indem gleichsam jedes Massentheilchen polarisirend auf das folgende wirkt. Die Polarität eines Magnets geht also nicht aus der Anhäufung der magnetischen Flüssigkeiten an den Enden des Magnetstabs hervor, sondern ist nur eine Folge der gleichen Vertheilung beider Fluida in jedem Massentheilchen, und der Schein, als wäre in den Polen die magnetische Materie zusammengedrängt, ist nur eine Folge davon, daß die resultirende Wirkung aller Theile in der Nähe dieser Pole stärker sein muß, als an allen anderen Stellen.

Von dieser Art der Vorstellung ausgehend sagt man daher auch, die Stäbchen würden nicht durch Mittheilung, sondern durch Vertheilung magnetisch. Zur Unterstützung der eben entwickelten Ansicht stelle man auch noch folgende Versuche an: 1) Man lege zwei gleich starke Magnetstäbe mit ihren ungleichnamigen Polen an einander, so wird man finden, daß Eisen von ihnen entweder gar nicht mehr oder doch nur äußerst schwach angezogen wird. Nun lege man aber die gleichnamigen Pole an einander, so ist die Anziehung sofort stärker, als die nur von einem Pole

Digitized by Google

ausgehende. 2) Man hänge einen kleinen Schlüssel mit dem einen Ende an den einen Pol eines Magnets, und nähere dann seitwärts dem oberen Ende des Schlüssels den ungleichnamigen Pol eines anderen, wenigstens ebenso kräftigen Magnets, so fällt der Schlüssel ab.

Diese Versuche zeigen nämlich, daß ein Körper, in welchem beide Magnetismen an einer Stelle in gleichem Maße vorhanden sind, an dieser Stelle keine magnetischen Erscheinungen zeigen kann.

§. 44. **Fortsetzung.** Wenn man eine Magnetnadel, z. B. eine magnetisirte Stricknadel, entzwei bricht, so enthält der eine Theil nicht bloß Nord-, der andere Südmagnetismus, sondern jeder der beiden Theile stellt einen vollständigen Magnet mit zwei Polen dar. Die ursprünglich getrennten Enden behalten ihre Pole, die vorher vereinigt gewesenen Enden dagegen bekommen die entgegengesetzten Pole. Jedes dieser Stücke kann man nun wieder entzwei brechen, und die Erscheinungen sind abermals dieselben, wie sie eben beschrieben wurden.

Dieser Versuch liefert einen Beleg für die Wahrscheinlichkeit der in dem vorhergehenden Paragraph entwickelten Ansicht. Denn wäre in der einen Hälfte eines Magnets die eine magnetische Flüssigkeit angehäuft, und in der anderen die andere, dann ließe sich nicht einsehen, wie jedes abgebrochene Stück jedes Mal 2 entgegengesetzte Pole haben könne. Es muß sie aber haben, sobald in jedem Molecül eines Magnets die beiden Flüssigkeiten auf dieselbe Weise getrennt vorhanden sind.

§. 45. **Coërcitivkraft.** Studirt man die Versuche in §. 42 etwas genauer, so findet man noch einen Unterschied, je nachdem man dem Magnet ein Stäbchen von weichem Eisen oder von Stahl genähert hat. In einem Stäbchen von weichem Eisen erfolgt nämlich die magnetische Vertheilung unter sonst gleichen Umständen viel leichter, als in einem Stahlstäbchen, und wenn man dann den Magnet, welcher die Vertheilung hervorgerufen hat, wieder entfernt, so hört die Polarität in dem weichen Eisen gar bald wieder auf, während sie in den Stahlstäbchen fortdauert.

Wir müssen daher annehmen, daß die Theilchen des Stahls der Bewegung der magnetischen Flüssigkeiten einen größeren Widerstand entgegensetzen, als die Theilchen des weichen Eisens. Diese der Vertheilung widerstrebende Kraft nennt man die Coërcitivkraft (coërcēre, zusammenhalten).

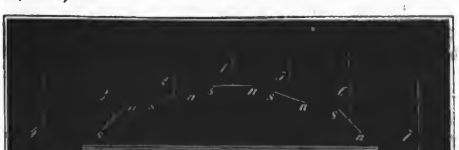


Fig. 10.

§. 46. **Magnetische Curven.** Hängt man ein Stückchen Eisendraht oder auch eine magnetische Stahlnadel in ihrem Schwerpunkte an einem Faden auf, und bringt sie über die Mitte eines Magnetstabs, so nehmen sie eine mit dem Magnetstabe parallele Lage an. Bringt man sie dagegen an eine dem einen Pole nähere Stelle, so senkt sich dasjenige Ende, welches diesem Pole am nächsten ist, und zwar desto mehr, je größer der Unterschied ihrer Entfernungen von beiden Polen ist. Grade über dem einen

Digitized by Google

Pole stellen sie sich, wenn sie in ihrem Schwerpunkt unterstützt sind, ganz vertical. Der Unterschied, ob man den Versuch mit einem Stückchen Eisendraht oder einer magnetischen Stahlnadel angestellt hat, ist nur der, daß bei Anwendung letzterer die Erscheinungen mit größerer Lebhaftigkeit erfolgen.

Es erklärt sich diese Erscheinung leicht auf folgende Weise. In der Lage 1 (Fig. 10) entsteht dem Nordpol N gegenüber ein Südpol s und dem Südpol S gegenüber ein Nordpol n. Weil aber s von N ebenso stark angezogen wird, als n von S, so kann das aufgehängte Stäbchen nur eine dem Magnetstabe parallele Lage annehmen. In der Lage 2 senkt sich s, weil es wegen der größeren Nähe von N stärker angezogen wird, als n von S u. s. f. Aus dem eben erläuterten Versuch erklärt sich auch die Erscheinung der magnetischen Curven. Wenn man nämlich ein Kartenblatt oder ein Papierblatt auf einen Magnet legt, Eisenfeile durch ein feines Sieb darauf fallen läßt, und ganz schwach an das Papier anstößt, so ordnen sich die Eisentheilchen in regelmäßigen Curven, welche von einem Pole zum anderen gehen. Die kleinen Eisentheilchen werden nämlich durch Einwirkung des Magnets alle polarisch, und ordnen sich demnach ihren respectiven Entfernungen von den Polen des Magnets gemäß.

§. 47. **Methoden, künstliche Magnete anzufertigen.** Wir sahen, daß, wenn wir einen Stab von einem des Magnetismus fähigen Körper in die Nähe eines Magnetpols oder noch besser zur wirklichen Berührung mit einem Magnetpole bringen, die magnetischen Kräfte in dem Stabe wirksam werden; ferner, daß sie auch selbst nach Entfernung des Magnets noch wirksam bleiben, wenn der Stab ein Stahlstab war. Auf diese Erfahrungen nun gründen sich die verschiedenen Methoden, künstliche Magnete anzufertigen. Grade Stahlstäbe zu magnetisiren dienen folgende Methoden: 1) der einfache Strich. Er besteht darin, daß man einen Pol eines Magnets auf das eine Ende eines graden Stahlstabs aufsetzt, und ihn gegen das andere Ende hin bewegt. Hier wird er entweder seitwärts abgezogen, oder über das Ende hinausgeführt. Dieses Verfahren wird mehrere Male wiederholt, indem man jedes Mal den abgezogenen Pol in der Luft an seine ursprüngliche Stelle zurückbringt. An dem Ende, wo der Pol aufgesetzt wird, entsteht im Stabe der gleichnamige Pol, und an dem Ende, wo er abgezogen wird, der ungleichnamige Pol. Man kann auch so verfahren, daß man einen Pol des Streichmagnets nicht am einen Ende, sondern in der Mitte des Stabes aufsetzt, ihn gegen das eine Ende hinführt und dort abzieht. Dies wird mehrere Male wiederholt. Dann setzt man den anderen Pol in der Mitte auf, und streicht mit demselben ebenso oft gegen das andere Ende hin. Die beiden Hälften des magnetisirten Stabes erhalten diejenigen Pole, welche denen entgegengesetzt sind, mit welchen sie bestrichen wurden. Hat man 2 Streichmagnete von ungefähr gleicher Stärke, so kann man beide zugleich mit ungleichnamigen Polen in der Mitte, und zwar so aufsetzen, daß sie mit dem zu magnetisirenden Stabe einen spitzen Winkel von ungefähr 20° bilden, und dann gleichzeitig von der Mitte aus nach den beiden Enden hinstreichen.

2) Der Doppelstrich. Bei dieser Methode bedarf man zweier Magnetstäbe. Sie werden mit ihren ungleichnamigen Polen auf der Mitte des zu magnetisirenden Stabes aufgesetzt, und dann streicht man mit ihnen nach

Digitized by Google

beiden Enden hin sowohl vorwärts, als rückwärts, und hebt endlich in der Mitte auf. Statt zweier Magnetstäbe genügt natürlich auch ein hufeisenförmiger Magnet.

3) Der Kreisstrich. Hier werden 4 Stahlstäbe oder 2 Stahlstäbe und 2 Stäbe von weichem Eisen so gelegt, daß sie ein Rechteck bilden, und auf diesem werden 2 ungleichnamige Pole mehrmals ringsum geführt. Man zieht dann die Streichpole an einer Verbindungsstelle zweier Stäbe von beiden ab. Daß man sich auch bei dieser Methode ebensowohl zweier Magnetstäbe, als auch eines hufeisenförmigen Magnets bedienen kann, leuchtet ein.

Einen hufeisenförmigen Stahlstab magnetisirt man gewöhnlich auch mit einem hufeisenförmigen Magnete. Man legt vor die Enden des Stahlstabes ein Stück weiches Eisen (Anker), und setzt den Magnet entweder auf die Enden des Stahlstabes und streicht von da bis über die Krümmung hinaus; oder man setzt den Magnet auf die Krümmung und streicht dann gegen die Enden hin. Die Operation wird mehrere Male wiederholt. Im ersteren Falle erhalten die Schenkel des zu magnetisirenden Stahlstabs mit dem Streichmagnete gleichnamige, im letzteren Falle ungleichnamige Pole. Oefter ist es bequemer, den Streichmagnet hinzulegen, und den zu magnetisirenden Stahlstab mit vorgelegtem Anker an den Polen des Streichmagnets auf eine der beiden angegebenen Arten vorbeizuziehen. Auch der Kreisstrich läßt sich auf die Magnetisirung hufeisenförmiger Stahlstäbe anwenden. Man hat dann nur 2 Hufeisen zu einem Oval an einander zu schieben.

In einem Stabe oder in einer Stricknadel kann man auch mehr als 2 Pole hervorrufen, indem man die Länge in z. B. 3 gleiche Theile theilt, und den ersten mit dem Nordpol, den zweiten mit dem Südpol, und den dritten wieder mit dem Nordpol eines Magnets bestreicht. Einen Magnet mit 3 Polen erhält man auch, wenn man eine Stahlnadel in ihrer Mitte mit einem Magnetpol berührt, die berührte Stelle erhält den entgegengesetzten Pol, die Enden der Stahlnadel aber gleichnamige Pole.

Wird eine der beschriebenen Streichmethoden, durch welche in einem Stabe Magnetismus hervorgerufen wird, auf einen Magnet in entgegengesetztem Sinne angewandt, so wird in letzterem der Magnetismus wieder vernichtet. Das Entmagnetisiren wird auch dadurch erzielt, daß man einen Magnet bis zum Weißglühen erhitzt. Wenn er dann erkaltet ist, bemerkt man an ihm durchaus keine magnetische Eigenschaften mehr.

§. 48. Magnetische Magazine; Armatur natürlicher Magnete. In §. 43 ist gezeigt, daß, wenn man 2 Magnetstäbe mit ihren gleichnamigen Polen an einander legt, die Anziehung viel stärker ist, als wenn sie nur von einem Pole ausgeht. Auf dieser Erfahrung beruht die Anfertigung der magnetischen Magazine oder magnetischen Batterien. Man versteht darunter eine Verbindung mehrerer einzelnen Magnetstäbe, doch so, daß in allen die gleichnamigen Pole in Berührung gebracht werden. Die ganze Vorrichtung ist dann nur als ein starker Magnet zu betrachten.

Daß unter sonst gleichen Umständen ein hufeisenförmig gebogener Magnetstab (eine Lamelle, lamella ein Blättchen Metall) eine größere Tragkraft besitzt, als ein grader Magnetstab, leuchtet ein, wenn man bedenkt, daß bei ersterem durch Vermittlung des Ankers auf die zu tragende Last die anziehenden Kräfte beider Pole zu gleicher Zeit einwirken. Die stärksten Magnete erhält man daher, wenn man mehrere Lamellen zu einer

Digitized by Google

magnetiſchen Batterie verbindet. Es gründet ſich hierauf auch die Methode, die Tragkraft der natürlichen Magnete durch die ſ. g. Armatur oder Bewaffnung zu verſtärken. Man armirt nämlich einen natürlichen Magnet, indem man die Stellen der Pole abſchleift, und mit Platten von weichem Eiſen belegt. Dieſe an dem Magnete angeſchraubten Platten läßt man dann an einer Seite des Magnets in dickere Füße, die künſtlichen Pole genannt, enden, an welche ein Anker vorgelegt wird. Vermöge der magnetiſchen Vertheilung (§. 43) erhält jede Platte den entgegengeſetzten, der Fuß aber den nämlichen Pol, welchen der Magnet ſelbſt auf der Seite hat, an welche die Platte angelegt iſt.

§. 49. **Verſchiedenes Verhalten der magnetiſchen und diamagnetiſchen Körper zwiſchen den Polen eines Magnets.** Wenn man ein Stäbchen von einem des Magnetismus fähigen Körper zwiſchen den Polen eines ſtarken Hufeiſenmagnets mit freier Beweglichkeit aufhängt, ſo kommt es nicht eher zur Ruhe, als bis ſeine Längenrichtung mit der graden Linie, welche die beiden Pole des Magnets mit einander verbindet, zuſammen fällt, oder ihr parallel iſt, oder, wie man es zu nennen pflegt, bis es ſich axial geſtellt hat. Nimmt man dann ein Stäbchen eines diamagnetiſchen Körpers (§. 35), ſo kommt dies nicht eher zur Ruhe, als bis ſeine Längenrichtung ſich ſenkrecht zu der die Pole des Magnets verbindenden graden Linie geſtellt hat. Man ſagt dann, es habe die äquatoreale Lage angenommen. Wie man ſich in letzterem Falle die Wirkſamkeit des Magnets zu erklären habe, darüber iſt noch keine begründete Anſicht aufgeſtellt worden. Aus Verſuchen Plücker's folgt, daß die magnetiſchen und diamagnetiſchen Wirkungen eines Magnets nicht denſelben Geſetzen unterworfen ſind. Die magnetiſchen Wirkungen nehmen mit der Entfernung von dem Magnete langſamer ab, als die diamagnetiſchen. Daraus läßt ſich nun auch die Erſcheinung erklären, daß gewiſſe Körper, wahrſcheinlich ſolche, in welchen magnetiſche und diamagnetiſche Subſtanzen mit einander gemiſcht ſind, ſich je nach der verſchiedenen Entfernung von den Magnetpolen bald axial, bald äquatoreal ſtellen. So ſtellt ſich nach Plücker ein rechteckiges Stückchen Kirſchbaumrinde, wenn es ſo aufgehängt iſt, daß es mit ſeiner Längenrichtung horizontal ſchwingend zwiſchen den beiden möglichſt genäherten Polſpitzen*) noch eben frei ſich bewegen kann, äquatoreal, wie ein diamagnetiſcher Körper; werden aber die Pole weiter von einander entfernt, oder wird das Stückchen Baumrinde über die Linie der Pole gehoben, oder unter dieſelbe geſenkt, dann ſtellt es ſich axial, wie ein magnetiſcher Körper.

Plücker hat auch das Verhalten kryſtalliſirter Körper zwiſchen den Magnetpolen beobachtet, und glaubt nach ſeinen Beobachtungen das Geſetz aufſtellen zu können: Die optiſchen Aren der Kryſtalle (vergl. §. 266) werden durch die Pole eines Magnets entweder abgeſtoßen oder angezogen, je nach dem kryſtalliniſchen Gefüge der Kryſtalle. Iſt der Kryſtall ein optiſch negativer, dann ſoll Abſtoßung ſtattfinden; iſt er aber optiſch poſitiv, Anziehung (§. 270). Durch neuere Verſuche von Knoblauch und Tyn-

*) Bei den Apparaten, welche zu ſolchen Verſuchen gewöhnlich gebraucht werden, werden auf die Pole Stücke von weichem Eiſen aufgelegt, welche nach der einen Seite hin coniſch zugeſpitzt ſind, und denen eine verſchiedene Entfernung von einander gegeben werden kann.

Digitized by Google

dall ist jedoch Plücker's Ansicht nicht bestätigt worden, dagegen sind die genannten Physiker zu folgenden Resultaten gelangt: 1) dieselbe Richtung, welche in irgend einem rein diamagnetischen Krystall sich senkrecht auf die Verbindungslinie der beiden Magnetpole einstellt, wendet sich bei einem rein magnetischen Körper von gleicher krystallinischer Structur den Polen zu. 2) In Körpern, deren Molecüle nicht nach allen Seiten hin gleich weit von einander abstehen, ist die diamagnetische oder magnetische Wirkung, welche sich an ihnen zwischen den Polen kund gibt, immer nach derjenigen Richtung am stärksten, in welcher die materiellen Theilchen am nächsten bei einander sind.

§. 50. **Erdmagnetismus.** In §. 40 ist schon bemerkt, daß ein frei beweglicher Magnet das Bestreben habe, sich mit dem einen Pol stets nach der nördlichen, und mit dem andern stets nach der südlichen Himmelsgegend zu wenden. Fragen wir nun zunächst nach der Ursache dieser Erscheinung, so müssen wir uns daran erinnern, daß ein beweglicher Magnet unter dem Einfluß eines anderen stets nur in einer bestimmten Richtung zur Ruhe kommen kann, nämlich nur dann, wenn die ungleichnamigen oder freundschaftlichen Pole einander genähert sind. Es liegt also der Schluß nahe, daß die Erde selbst auf eine freischwingende Magnetnadel wie ein Magnet einwirke, und daß daher die Nadel sich so wende, damit ihre Pole den Polen der Erde, mit welchen sie befreundet sind, so nahe als möglich kommen. Falls nun der Erde wirklich, wie jedem anderen Magnete, Pole zukommen, so müßte der eine nach Norden, der andere nach Süden gelegen sein. Nennen wir nun den ersteren den magnetischen Nordpol, den letzteren den magnetischen Südpol der Erde, so ist ersichtlich, daß wir die Pole der Magnetnadel eigentlich falsch benennen (in Frankreich nennt man daher auch den Nordpol der Magnetnadel Südpol, und umgekehrt). Die Frage, wodurch die Erde die magnetische Kraft erhalte, müssen wir einstweilen noch unbeantwortet lassen; es genügt für's Erste anzunehmen, daß sie sie besitze. Jetzt können wir uns z. B. erklären, warum ein vertical gehaltener Stab von weichem Eisen (Stangen an den Fenstern, an den Thüren von Schränken u. s. w.) sich an seinem unteren Ende stets nordpolarisch, und an seinem oberen Ende südpolarisch zeigt (das untere Ende ist dem magnetischen Nordpole der Erde näher). Wird der Stab umgedreht, so wechseln sofort auch die Pole desselben. An einer vertical gehaltenen Stahlstange tritt wegen der größeren Coërcitivkraft des Stahls (§. 45) die Polarität nicht sogleich hervor. Dagegen zeigen sich oft bei näherer Untersuchung fast alle stählernen Werkzeuge einer Schlosserwerkstätte, wie z. B. Feilen, Bohrer u. s. w. mehr oder weniger magnetisch. Wir schließen hieraus, daß die vertheilende Wirkung des Erdmagnetismus auf Stahl durch Schlagen, Hämmern, Feilen u. s. w. befördert werde. Dieser Schluß wird noch durch die Erfahrung bestätigt, daß ein Stahlstab, welchen man vertical auf weiches Eisen stellt, magnetisch wird, nachdem man auf das obere Ende einige Schläge mit einem Hammer gethan hat. Durch dieses Verfahren erhalten wir auch ein Mittel, uns einen künstlichen Magnet ohne Hilfe eines anderen Magnets anzufertigen.

§. 51. **Magnetische Declination.** Beobachtet man eine horizontal schwingende Magnetnadel etwas genauer, so ergibt sich, daß ihr Nordpol, nachdem sie zur Ruhe gekommen ist, nicht genau nach dem geographischen

Digitized by Google

Norden zeigt, ſondern etwas nach Weſten abweicht. Zur näheren Kenntniß dieſer Abweichung muß erſt der Begriff des magnetiſchen Meridians feſtgeſtellt werden. Man verſteht darunter diejenige Verticalebene, in welcher ſich die Pole einer frei hängenden Magnetnadel, dieſelbe als Linie betrachtet, befinden. Vergleicht man nun den magnetiſchen Meridian mit dem geographiſchen deſſelben Ortes, ſo findet man, daß beide ſich unter einem Winkel ſchneiden. Da dieſer Winkel die erwähnte Abweichung mißt, ſo wird er ſelbſt die Abweichung oder Declination des Ortes genannt. Er beträgt in unſeren Gegenden etwa 18°. Inſtrumente, deren man ſich zur genauen Abmeſſung dieſes Winkels bedient, heißen Declinationsbouſſolen oder Declinatorien (Bouſſolen im Allgemeinen ſind ſolche Vorrichtungen, in welchen im Mittelpunkte eines eingetheilten Kreiſes ein Stift vertical aufgerichtet iſt, auf welchem eine Magnetnadel ſchwingt), und die in denſelben gebrauchten Magnetnadeln Declinationsnadeln.

Durch Beobachtungen an verſchiedenen Stellen der Erdoberfläche hat man gefunden, daß die Declination durchaus nicht an allen Orten gleich iſt. Für nahe gelegene Orte iſt die magnetiſche Declination ungefähr gleich groß, und an ſolchen Orten ſtehen demnach die Magnetnadeln parallel. Hierauf beruht die Anwendung der Bouſſole zum Winkelmeſſen beim Feldmeſſen und in der Markſcheidekunſt. Wenn die Declination eines Ortes bekannt iſt, ſo kann man auch bei bedecktem Himmel die Lage des Meridians des Ortes finden, d. h. man kann ſich orientiren. Man bedient ſich dazu des Compaſſes, der ſich dadurch von der Bouſſole unterſcheidet, daß in ihm die Windroſe die Stelle des eingetheilten Kreiſes der Bouſſole vertritt.

Während die Declination z. B. für London 25° beträgt, iſt ſie für Moskau nur 3°. Es gibt auch Orte, an welchen ſie = 0° iſt, ja Orte, an welchen die Abweichung ſogar keine weſtliche, ſondern eine öſtliche iſt, wie z. B. in faſt ganz Aſien, dem ſtillen Ocean, und dem größten Theil von Amerika. Verbindet man die Orte der Erde, an welchen die Abweichung = 0° iſt, durch eine Linie, ſo nennt man dieſelbe die agoniſche Linie (ἀ in Zuſammenſetzungen negirt, und γωνία Winkel) oder die Linie ohne Abweichung. Verbindet man ebenſo immer diejenigen Orte, an welchen die Abweichung gleich iſt, durch eine Linie, ſo heißen ſolche Linien iſogoniſche Linien (ἴσος gleich, und γωνία Winkel) oder Linien gleicher Abweichung. Die nicht in ſich ſelbſt zurücklaufenden iſogoniſchen Linien ſcheinen ſämmtlich entweder nach einem Punkte in der Nähe des Nordpols, oder nach einem Punkte in der Nähe des Südpols zu convergiren. Dieſe Punkte nennt man daher auch die magnetiſchen Convergenzpunkte oder die magnetiſchen Pole der Erde. Die geographiſche Lage derſelben iſt durch den berühmten Seefahrer James Roß näher beſtimmt worden. Am magnetiſchen Nordpol (im Norden von Amerika) befand ſich derſelbe im Mai 1833 auf ſeiner zweiten Polarreiſe; dem magnetiſchen Südpol war er im Jahre 1841 im Süden von Van-Diemensland wenigſtens ſehr nahe gekommen. Die geographiſche Lage des magnetiſchen Nordpols iſt 70° 5′ N. Br. und 96° 46′ weſtl. Länge von Greenwich (= 280° 55′ öſtl. Länge von Ferro), die des Südpols etwa 76° S. Br. und 153° öſtl. Länge von Greenwich. Als man den magnetiſchen Nordpol umfuhr, zeigte ſtets der Nordpol der Nadel nach demſelben hin. An dem Pole ſelbſt hatte die Declinationsnadel

Digitized by Google

gar keine Richtkraft mehr. Beide Pole liegen nicht, wie die geographischen Pole der Erde, einander diametral gegenüber, sondern sind nur um einen Bogen von 161° eines durch dieselben gelegten Kreises von einander entfernt.

§. 52. **Fortsetzung.** Vergleicht man die Beobachtungen der magnetischen Declination an demselben Orte, welche im Verlauf eines längeren Zeitraumes angestellt wurden, so ergibt sich als allgemeines Resultat, daß selbst an demselben Orte die Declination sich nicht gleich bleibt, sondern in verschiedenen Zeiten verschieden ist. So war in Europa die Abweichung im 16. Jahrhundert östlich, die östliche Abweichung wurde aber immer kleiner, in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts wurde sie zu Null, ging dann in eine westliche Abweichung über, welche bis zu dem Anfange des gegenwärtigen Jahrhunderts wuchs, jetzt aber bereits wieder im Abnehmen begriffen ist. Die magnetische Declination betrug zu Paris im Jahre 1580 11° 30′ östlich, im Jahre 1610 8°, im Jahre 1663 0°, im Jahre 1700 8° 10′ westlich, im Jahre 1780 19° 55′, im Jahre 1814 22° 34′. Von dieser Zeit wird sie wieder kleiner, so daß sie im Jahre 1835 nur noch 22° 4′ betrug. Es steht sonach zu erwarten, daß sie abermals zu Null werden, und dann wieder in eine östliche umschlagen wird. Der magnetische Meridian scheint also zu beiden Seiten des geographischen Schwingungen von sehr großer Dauer zu machen. Daraus würde aber für uns hervorgehen, daß auch die Lage der magnetischen Pole keine fixe sein könne, sondern sich ebenfalls im Laufe der Zeiten verändere.

§. 53. **Regelmäßige und unregelmäßige Variationen der Magnetnadel.** Die in dem vorhergehenden §. erwähnten Aenderungen der magnetischen Declination sind aber nicht die einzigen, welche man an demselben Orte zu beobachten Gelegenheit hat. Man unterscheidet noch regelmäßige und unregelmäßige Variationen. Die letzteren nennt man auch Störungen oder Perturbationen. Die regelmäßigen Variationen zerfallen wieder in tägliche und jährliche. In der Nacht steht nämlich die Declinationsnadel ziemlich still, von Morgens bis gegen 2 Uhr Mittags wächst dann die westliche Abweichung, und wird von da an bis gegen 10 Uhr Abends wieder geringer. Die Größe dieses täglichen Schwingungsbogens ändert sich aber mit der Jahreszeit, und ist im Sommer viel größer, als im Winter. Es geht aus diesen Thatsachen offenbar hervor, daß diese Variationen mit der Temperatur in enger Verbindung stehen, da sie desto größer sind, je größer der Wechsel der Temperatur ist. Welcher Art diese Verbindung ist, läßt sich noch nicht mit Bestimmtheit angeben. Nach Dove werden die Variationen dadurch veranlaßt, daß die Wärme den Erdmagnetismus schwächt. Morgens sind die östlichen Gegenden wärmer, als die westlichen, folglich der Erdmagnetismus in den ersteren schwächer, als in den letzteren, welche daher auch die Nadel mehr nach sich hinziehen, d. h. die Declination muß wachsen. Da Nachmittags die westlichen Gegenden mehr erwärmt sind, als die östlichen, so muß dann die Nadel wieder mehr östlich gezogen werden, d. h. die Declination muß kleiner werden. Daß die täglichen Variationen im Sommer viel größer sind, als im Winter, erklärt sich dann dadurch, daß im Sommer die Temperatur während eines Tages viel größere Veränderungen erleidet, als im Winter (so war z. B. nach den Beobachtungen zu Frankfurt am Main im Jahre 1844 die geringste Differenz zwischen Maximum und Minimum desselben Tages im

Digitized by Google

Monat Dezember nur 0,3° R., im November 0,5°, im Januar 1,0°, aber im Juni 5°).

Die unregelmäßigen Variationen oder die Störungen sind der Größe nach bedeutender, als die regelmäßigen, und werden oft an weit entfernten Orten in demselben Augenblicke beobachtet. Besonders bemerkenswerth ist es, daß solche Störungen der Declinationsnadel stets wahrgenommen werden, wenn ein Nordlicht beobachtet wird, und zwar, daß dann die Magnetnadel selbst an solchen Orten sich in einer unruhigen Bewegung befindet, an welchen man das Nordlicht gar nicht sehen kann. Jedenfalls wird man bei einem Versuche, die Natur des Nordlichts zu erklären, diese Erfahrung nicht unberücksichtigt lassen dürfen.

§. 54. **Astatische Nadel.** Wenn man zwei gleich lange und gleich stark magnetisirte Nadeln auf irgend eine Weise so mit einander verbindet, daß die Nadeln parallel sind, und der Nordpol der einen sich über dem Südpol der anderen befindet, und wenn man dann diese zusammengesetzte Nadel an einem ungedrehten Faden aufhängt, so findet man, daß die zusammengesetzte Nadel kein Bestreben zeigt, eine bestimmte Richtung anzunehmen. Die eben beschriebene Vorrichtung nennt man daher eine astatische Nadel (ἄστατος, unstätig, unbeständig).

Der Grund der angegebenen Erscheinung ist offenbar darin zu suchen, daß die eine der verbundenen Nadeln stets die entgegengesetzte Bewegung von der anderen anzunehmen sucht, und daß demnach bei vollkommen gleich starker Magnetisirung beider Nadeln die Bewegung der einen durch die gleich große, entgegengesetzte Bewegung der anderen gänzlich aufgehoben wird. Da die astatische Nadel nicht durch die Einwirkung des Erdmagnetismus in einer bestimmten Richtung festgehalten wird, so muß sie demnach für die Einwirkung eines magnetischen Körpers viel empfindlicher sein, als die gewöhnliche Magnetnadel, und man wendet sie daher an, um die schwächsten magnetischen Wirkungen zu entdecken.

§. 55. **Magnetische Inclination.** Wenn man einen Stahlstab genau in seinem Schwerpunkte unterstützt, und um eine horizontale Axe sehr leicht beweglich macht, so bleibt er in jeder Lage, welche man ihm gibt, in Ruhe. Wird nun aber der Stab magnetisirt, und in den magnetischen Meridian gebracht, so sehen wir, daß sich sofort der Nordpol des Stabes senkt. Der Winkel, welchen in diesem Falle die Axe oder die Mittellinie des Stabes mit dem Horizonte bildet, nennt man die Neigung oder Inclination, und Instrumente zur genauen Messung dieses Winkels Inclinatorien, sowie die in denselben gebrauchten Magnetnadeln Inclinationsnadeln. Bringt man den Stab aus dem magnetischen Meridian heraus, und versetzt ihn dann in eine solche Lage, daß seine Schwingungen in einer Ebene vor sich gehen, welche senkrecht zum magnetischen Meridian ist, so stellt sich der Stab vertical.

Nachdem man erkannt hatte, daß die Declination nur Folge der magnetischen Kraft der Erde sei, mußte man annehmen, daß die wahre Richtung dieser Kraft doch keine horizontale, sondern eine gegen den Horizont geneigte sei. Diese wahre Richtung konnte bei der Declinationsnadel nicht hervortreten, weil sie nur in horizontaler Richtung freie Beweglichkeit besitzt; dagegen muß sie jedenfalls bei einer Nadel beobachtet werden, welche vollkommen freie Beweglichkeit hat, wie dies bei unserem Versuche der

Digitized by Google

Fall ist. Auf die Inclinationsnadel wirkt die ganze Kraft des Erdmagnetismus ein. Denkt man sich dagegen diese Kraft in zwei Seitenkräfte zerlegt *), in eine horizontale und eine verticale, so wirkt auf die Declinationsnadel nur der horizontale Theil, während der verticale Theil durch die Festigkeit des Stiftes, auf welchem die Nadel schwingt, aufgehoben wird. Läßt man dagegen die Schwingungen des Stabes oder der Nadel in einer Ebene vor sich gehen, welche senkrecht zum magnetischen Meridian ist, so ist jetzt die Wirkung des horizontalen Theils der Kraft des Erdmagnetismus durch die Festigkeit der horizontalen Axe gehemmt, und es bleibt demnach nur die Wirkung des verticalen Theils übrig, weßhalb dann die Nadel nur in verticaler Richtung zur Ruhe gelangen kann.

Mißt man die Größe der Inclination, so findet man, daß sie in Deutschland 65° bis 70° beträgt. Auch die Inclination ist an verschiedenen Orten verschieden. Im Allgemeinen wird sie desto größer, je mehr man sich den magnetischen Polen nähert. Am magnetischen Nordpol beobachtete Roß eine Inclination von 90°. Nähert man sich dem geographischen Aequator, so nimmt die Inclination ab, und in der Nähe desselben findet man Punkte, an welchen auch die Inclinationsnadel eine horizontale Lage annimmt, an welchen also die Inclination gleich Null ist. Verbindet man alle die Punkte, an welchen die Inclination gleich Null ist, durch eine Linie, so heißt diese Linie der magnetische Aequator. Der magnetische Aequator ist nicht ein größter Kreis, sondern eine unregelmäßig gekrümmte Linie. Er durchschneidet den geographischen Aequator zweimal, jedoch nicht in zwei genau diametral einander gegenüberliegenden Punkten. Südlich vom Aequator senkt sich natürlich der Südpol der Inclinationsnadel. Verbindet man alle Orte der Erdoberfläche, an welchen eine gleiche magnetische Inclination beobachtet wird, durch Linien, so werden diese Linien isoklinische Linien (ἴσος gleich, und κλίνειν neigen) genannt. Da man in früheren Zeiten die magnetische Neigung nicht beobachtete, so ist das vorliegende Material nicht bedeutend genug, um uns von der Inclination eine ebenso specielle Kenntniß, wie von der Declination zu verschaffen. Wir wissen nur so viel, daß gegenwärtig die Inclination in Europa abnimmt. Auch tägliche Variationen sind von Kreil durch stündliche

*) Da die Lehre von der Zerlegung der Kräfte erst später vorkommt, so möge zum Verständniß dieses und einiger noch folgenden Paragraphen einstweilen bemerkt sein, daß die Statik zeigt, auf welche Weise man für jede Kraft stets 2 andere Kräfte finden könne, welche durch ihr gleichzeitiges Zusammenwirken dasselbe leisten, wie die gegebene Kraft. Werden derselben wirklich 2 solche Kräfte substituirt, so sagt man, man habe die Kraft zerlegt. Die Kräfte an sich können nicht gemessen werden, sondern sie werden es durch ihre Wirkungen, die ja in den Kreis unserer Beobachtung fallen. Die Wirkungen sind Bewegungen, und eine Bewegung ist vollständig bekannt, wenn sowohl ihre Richtung, als auch ihre Größe gegeben ist. Beide lassen sich durch eine begrenzte grade Linie darstellen. Ist nun die gegebene Kraft durch eine solche begrenzte grade Linie ausgedrückt, und man betrachtet diese Linie als die Diagonale eines Parallelogramms, so sind die 2 an einander stoßenden Seiten des Parallelogramms die beiden Kräfte, die statt der gegebenen gesetzt werden können, die Seitenkräfte. Da indeß dieselbe begrenzte grade Linie die Diagonale von unzählig vielen Parallelogrammen sein kann, so kann also auch eine Kraft auf vielfache Weise zerlegt werden. In den meisten Fällen der Anwendung jedoch tritt, wie auch hier, die Beschränkung ein, daß die Seitenkräfte eine vorgeschriebene Richtung haben sollen, und dann gibt es, wie aus der Geometrie bekannt ist, nur eine Auflösung der Aufgabe.

Digitized by Google

Beobachtungen zu Prag nachgewiesen worden. Nach ihm soll die Inclination im Verlauf eines Tages 3 maxima und 3 minima haben.

§. 56. **Intensität.** Als Alexander von Humboldt ganz zu Anfang unseres Jahrhunderts seine Magnetnadel, welche zu Paris in zehn Minuten 245 Schwingungen vollendete, in Peru am magnetischen Aequator schwingen ließ, fand er, daß sie dort in derselben Zeit nur 211 Schwingungen machte, und doch hatte sie bei seiner Rückkehr nach Paris an magnetischer Kraft Nichts verloren. Ueberhaupt beobachtet man, daß dieselbe Nadel an verschiedenen Orten in derselben Zeit eine ungleiche Anzahl von Schwingungen vollendet.

Die Schwingungen der Nadel sind offenbar nur Folge der Einwirkung des Erdmagnetismus. Sie müssen also auch desto schneller erfolgen, je größer diese Einwirkung ist, und geben uns ein Mittel an die Hand, die Größe oder Intensität der Kraft des Erdmagnetismus zu bestimmen, während uns die Beobachtungen der Declination und Inclination nur über die Richtung, in welcher diese Kraft wirkt, Aufschluß gaben. Daß zu solchen Versuchen eigentlich nur eine Inclinationsnadel benutzt werden darf, geht daraus hervor, daß, wie wir oben gezeigt haben, nur auf diese die ganze Kraft des Erdmagnetismus einwirkt, da bei den Declinationsnadeln die Wirkung der verticalen Seitenkraft durch den Stift aufgehoben wird. Es kann nun nachgewiesen werden, daß die Intensitäten des Erdmagnetismus an zwei verschiedenen Orten sich verhalten müssen, wie die Quadrate der Schwingungszahlen derselben Nadel in derselben Zeit. Auf diese Art hat sich durch die Beobachtungen ergeben, daß die Intensität des Erdmagnetismus im Allgemeinen von dem magnetischen Aequator nach den magnetischen Polen hin wächst. Verbindet man wieder alle diejenigen Orte der Erdoberfläche, an welchen die Intensität gleich groß ist, durch Linien, so heißen diese Linien isodynamische Linien (ἴσος gleich und δύναμις Kraft). Auch die Intensität wird noch nicht lange genug beobachtet, und es ist daher die Anzahl der gemachten Beobachtungen noch viel zu klein, um etwas Bestimmtes über die säcularen Aenderungen der Intensität angeben zu können. Die bis jetzt gemachten Beobachtungen sprechen jedoch ebenfalls für ein Kleinerwerden der Intensität.

Auf Anregung von A. von Humboldt und durch die Bemühungen von Gauß sind an den verschiedensten Orten der Erde magnetische Observatorien errichtet, auf welchen ununterbrochen mit genauen Instrumenten beobachtet wird. Es wird sich auf diese Weise in kurzer Zeit ein solches Material anhäufen, daß viele bis jetzt noch unerledigt gebliebenen Fragen über den Erdmagnetismus ihre Beantwortung finden werden.

§. 57. **Methode, die magnetische Kraft zu messen.** Man versetze eine leicht bewegliche Magnetnadel in Schwingungen, und zähle, wieviel Schwingungen sie z. B. in einer Minute macht. Dann nähere man einem ihrer Pole in der Richtung des magnetischen Meridians den freundschaftlichen Pol eines sehr langen Magnetstabs, so wird man finden, daß sie jetzt in der Minute mehr Schwingungen macht, als vorher. Bringt man dann den Pol des langen Magnetstabs in größere Entfernung von der Nadel, so nimmt die Zahl der Schwingungen in der Minute zwar wieder ab, ist aber immer noch größer, als sie ohne die Anwesenheit des langen Magnetstabs war.

Digitized by Google

Zuerst war die Nadel offenbar nur unter dem Einfluß des Erdmagnetismus, das Quadrat der gefundenen Schwingungszahl kann demnach als Maß für die Größe des Erdmagnetismus gelten. Nach Annäherung des freundschaftlichen Poles des langen Magnetstabs steht sie aber unter der vereinigten Einwirkung des Erdmagnetismus und des Magnetstabs, und da beide in gleichem Sinne auf die Nadel wirken, so muß sie in schnellere Schwingungen gerathen. Das Quadrat der jetzt gefundenen Schwingungszahl ist also als Maß der vereinigten Kräfte anzusehen. Zieht man daher von diesem Quadrat das frühere Quadrat ab, so hat man auch ein Maß für die Kraft des Stabes in der gegebenen Entfernung. Daß bei weiterer Entfernung des Stabes die Schwingungszahl wieder kleiner wird, zeigt, daß die Wirkung eines Magnets mit der Entfernung abnimmt. Da man nun, wenn man von dem Quadrate der letzten Schwingungszahl das Quadrat der ersten Schwingungszahl abzieht, auch ein Maß für die Kraft des Magnetstabs in der größeren Entfernung hat, so braucht man nur die beiden Maße für die zwei verschiedenen Entfernungen mit einander zu vergleichen, um das Gesetz der Abnahme kennen zu lernen. Als Resultat wird sich ergeben, daß sich die Wirkungen eines Magnets umgekehrt wie die Quadrate seiner Entfernungen verhalten.

Aendern wir den mitgetheilten Versuch dahin ab, daß wir, statt einen und denselben Magnetstab in verschiedene Entfernungen von der Magnetnadel zu bringen, nach einander zwei verschiedene Magnetstäbe in genau gleicher Entfernung auf die Nadel einwirken lassen, so ist uns offenbar ein Mittel geboten, auch die Wirksamkeit zweier Magnete mit einander zu vergleichen.

§. 58. **Ursache des Erdmagnetismus.** Zum Schlusse drängt sich uns noch die Frage auf, worin denn eigentlich die magnetische Kraft der Erde begründet sei. Bis jetzt hat man freilich nur durch Aufstellung von Hypothesen eine Beantwortung dieser wichtigen Frage versuchen können. Es sind hauptsächlich zwei hypothetische Ansichten geltend gemacht worden. Nach der einen, welche besonders durch Hansteen ihre Verbreitung fand, ist die Erde durch eine in ihrem Innern befindliche, in den Polen nach Außen hervorgehende Kraft magnetisch. Nach der anderen ist der Magnetismus der Erde die Folge einer fortdauernden äußeren Einwirkung, welche wahrscheinlich die Wärme und die durch dieselbe erzeugte Electricität sein muß (§. 53 und §. 115.).

Dritter Abschnitt.

Electricität.

Erstes Kapitel.

Von der Reibungselectricität.

§. 59. **Der electrische Zustand der Körper und durch denselben bedingte Erscheinungen.** 1) Reibt man eine Glasröhre der Länge nach mit Tuch oder Seidenzeug, und nähert dieselbe sodann kleinen auf einem Tische liegenden Papierschnitzchen oder anderen leichten Körperchen, so ge-

Digitized by Google

rathen dieſe in eine hin- und hergehende Bewegung; ſie werden von dem geriebenen Glaſe angezogen, bald aber wieder abgeſtoßen, und, nachdem ſie den Tiſch berührt haben, abermals angezogen u. ſ. w. Auch noch andere geriebene Körper zeigen dieſelben Erſcheinungen, z. B. Siegellack, Schellack, Schwefel u. a. 2) Hat man zu dem Verſuche eine etwas weite Glasröhre genommen, ſo hört man bei einem einigermaßen kräftigen Reiben mit einem ſeidenen Tuche auch ein Kniſtern, im Dunkeln erſcheint an der Glasröhre ein Lichtſchein, und es brechen, wenn man ihr mit dem Knöchel eines Fingers nahe kommt, Funken hervor.

Wir ſehen alſo hier Körper Eigenſchaften annehmen, welche ihnen in ihrem gewöhnlichen Zuſtande nicht zukommen. Etwas Aehnliches haben wir ſchon im vorhergehenden Abſchnitt kennen gelernt, wo wir auch Eiſen und Stahl in einen Zuſtand verſetzt ſahen, in welchem ſie Eiſen anzogen. Dort aber blieb das angezogene Eiſen an dem Magnete haften, und wurde nicht wieder abgeſtoßen. Auch war die Anziehung des Magnets nur auf ganz wenige Körper beſchränkt, während es bei unſerem Verſuche keinen Unterſchied macht, aus welchem Stoffe die kleinen Körperchen ſind, wenn ihr Gewicht nur klein genug iſt, um durch die Anziehung des geriebenen Körpers überwältigt werden zu können. Wie weiter unten gezeigt wird, werden an Körpern, welche in den Zuſtand verſetzt ſind, in welchem ſie obige Eigenſchaften beſitzen, unter günſtigen Umſtänden auch noch andere Eigenſchaften beobachtet. Auch wird ſich aus dem Folgenden ergeben, daß die Reibung nicht das einzige Mittel iſt, um die Körper in dieſen Zuſtand zu verſetzen. Da der Bernſtein der erſte Körper war, von welchem man wußte, daß er durch Reiben die Eigenſchaft erhielt, andere leichte Körper anzuziehen und wieder abzuſtoßen (es war dies ſchon den Alten bekannt), ſo nennt man nach ihm dieſen Zuſtand der Körper den *electriſchen Zuſtand* (ἤλεκτρον, Bernſtein), die Erſcheinungen, welche dann an den Körpern beobachtet werden, *electriſche Erſcheinungen*, die Körper, welche ſich in dem Zuſtande befinden, *electriſche* oder *electriſirte Körper*, und endlich die Urſache der electriſchen Erſcheinungen *Electricität*.

§. 60. **Electricitätserregung durch Mittheilung.** Hängt man ein leichtes Körperchen, etwa ein Hollundermarkkügelchen, an einem ſeidenen Faden auf, und nähert ihm dann eine mit einem ſeidenen Tuche geriebene Glasröhre, ſo wird es lebhaft von der Röhre angezogen, und dann wieder abgeſtoßen, wie man namentlich daraus ſieht, daß es jetzt der Glasröhre ausweicht, und in der Nähe derſelben ſelbſt die verticale Lage verläßt. Wenn man ihm nun nach Entfernung der Glasröhre leichte Körperchen, z. B. ganz kleine Papierſchnitzchen, nahe bringt, ſo werden dieſe von ihm angezogen.

Daraus, daß das Hollundermarkkügelchen die Eigenſchaft erlangt hat, die Papierſchnitzchen anzuziehen, folgern wir, daß es jetzt ſelbſt in den electriſchen Zuſtand verſetzt ſei. Die Urſache aber, daß es den electriſchen Zuſtand angenommen hat, kann keine andere ſein, als daß es mit der electriſirten Glasröhre in Berührung geweſen iſt. Wir lernen alſo hier neben der Reibung ein zweites Mittel kennen, die Electricität in einem Körper zu erregen, nämlich dadurch, daß man ihn mit einem ſchon im electriſchen Zuſtande befindlichen Körper berührt. Man hat dieſer Art, die Electricität in einem Körper zu erregen, den Namen *electriſche* Mittheilung gegeben.

Digitized by Google

§. 61. **Positive und negative Electricität.** Wenn man dem Hollundermarkkügelchen nach dem vorhergehenden §. Electricität vermittelst einer geriebenen Glasröhre mitgetheilt hat, und man nähert ihm nun eine andere geriebene Glasröhre, so wird es von dieser nicht angezogen, sondern ebenfalls abgestoßen; nähert man ihm aber eine geriebene Harzstange, so wird es angezogen. Hatte man ihm dagegen durch eine geriebene Harzstange Electricität mitgetheilt, so wird es von jeder anderen geriebenen Harzstange abgestoßen, dagegen von einer geriebenen Glasstange angezogen. Man kann den Versuch auch dahin abändern, daß man 2 an seidenen Fäden hangende Hollundermarkkügelchen nimmt. Sind beide durch eine geriebene Glasstange, oder beide durch eine geriebene Siegellackstange electrisirt, so stoßen sie sich einander ab. Ist aber das eine durch eine Glasstange, das andere durch eine Siegellackstange electrisch geworden, so ziehen sie sich an, und zeigen sich nach geschehener Berührung entweder ganz unelectrisch, indem sie nicht weiter auf einander einwirken, oder sie stoßen sich, wenn auch nur schwach, einander ab.

Es folgt hieraus, daß der electrische Zustand einer geriebenen Glasstange von demjenigen einer geriebenen Harzstange verschieden ist, und daß es demnach auch 2 verschiedene Electricitäten geben müsse. Von diesen nannte man anfänglich die eine Glaselectricität und die andere Harzelectricität. Man glaubte nämlich, Glas und Harz könnten immer nur in den nämlichen electrischen Zustand versetzt werden, und wußte noch nicht, daß der electrische Zustand auch durch denjenigen Körper bedingt wird, mit welchem sie gerieben werden. Da der Versuch ergeben hat, daß 2 Körper in den verschiedenen electrischen Zuständen nach gegenseitiger Berührung entweder unelectrisch werden, oder wenigstens nur noch den einen electrischen Zustand, und zwar in einem geringen Grade zeigen, so sieht man, daß sich die beiden Electricitäten grade wie entgegengesetzte Größen verhalten. Aus diesem Grunde nennt man gegenwärtig allgemein die eine die positive und die andere die negative Electricität, und bezeichnet sie kurz dem entsprechend mit + E. und — E. Durch Uebereinkunft ist festgestellt worden, daß die Electricität, welche das mit Wolle geriebene Glas zeigt, als die positive angesehen wird. Aus unserem Versuche lernen wir zugleich das wichtige, und dem Fundamentalgesetz des Magnetismus ganz entsprechende Gesetz kennen: Die gleichnamigen Electricitäten stoßen sich ab, die ungleichnamigen ziehen sich an.

Ueber das Wesen der beiden Electricitäten sind 2 Hypothesen aufgestellt worden, welche in der Annahme eigener electrischer Materien übereinstimmen. Nach der einen, von Robert Symmer, einem Engländer, aufgestellten, und am weitesten verbreiteten Ansicht nimmt man 2 äußerst feine, unwägbare flüssige Materien an, die in der Körperwelt allenthalben verbreitet sind, die positive und die negative electrische Materie. Im unelectrischen Zustande sind beide in den Körpern so vertheilt, daß sich überall neben einem Theilchen der einen auch ein Theilchen der anderen befindet. Ist aber an einer Stelle eines Körpers mehr von der einen, als von der anderen angehäuft, so zeigt sich diese Stelle electrisch, und zwar positiv oder negativ electrisch, je nachdem die positive oder die negative electrische Materie an dieser Stelle das Uebergewicht hat. Die Erklärung ist also hier ganz derjenigen entsprechend, welche oben bei den magnetischen Erscheinungen

Digitized by Google

gegeben wurde, nur wird hier noch angenommen, daß die electrischen Materien nicht immer an ein und dasselbe Körpertheilchen gebunden seien, sondern daß sie auch von einem Theilchen zu einem andern übergehen können, was bei dem Magnetismus nicht der Fall war. Diese Symmer'sche Ansicht nennt man das dualistische System (duo, zwei) und die Anhänger desselben Dualisten. Nach der anderen von Franklin aufgestellten Hypothese gibt es blos eine einzige electrische Materie, deren Theilchen sich gegenseitig abstoßen, aber von den Theilchen der wägbaren Stoffe angezogen werden. Wenn ein Körper eine gewisse Quantität der electrischen Materie enthält, dann ist er unelectrisch, enthält er mehr, positiv, und enthält er weniger, negativ electrisch. Weil hier nur eine electrische Materie vorausgesetzt wird, heißt diese Hypothese das unitarische System (unus, einer) und seine Anhänger Unitarier.

§. 62. **Das electrische Pendel; Bennet's Goldblattelectroscop.** Ein an einem seidenen Faden aufgehangenes Hollundermarkkügelchen, das s. g. electrische Pendel, kann also dazu dienen, zu untersuchen, ob ein Körper im electrischen Zustande ist oder nicht. Man kann aber mittelst desselben auch noch die weitere Frage beantworten, ob ein Körper positiv oder negativ electrisch ist. Zu dem Ende bringt man das Kügelchen erst mit dem Körper in Berührung, dann sieht man, ob es von einer geriebenen Glasstange oder einer geriebenen Siegellackstange abgestoßen wird. Im ersteren Falle ist es positiv, im letzteren negativ electrisch. Daß man auch hier ebenso wenig, wie bei dem Magnetismus, aus einer Anziehung durch die Glasstange oder die Siegellackstange auf den entgegengesetzt electrischen Zustand des Kügelchens schließen dürfe, geht schon daraus hervor, daß es auch in dem unelectrischen Zustande angezogen wird. Das electrische Pendel ist demnach ein Electroscop (σκοπέω, spähen, untersuchen) der einfachsten Construction (unter einem Electroscope versteht man nämlich jede Vorrichtung, durch welche der electrische Zustand der Körper nachgewiesen werden soll); es ist jedoch nicht für alle Zwecke empfindlich genug, weil die nachzuweisende Electricität schon eine ziemliche Stärke haben muß, wenn sie die Masse des Kügelchens in Bewegung setzen soll. Diesem Uebelstande ist in dem Bennet'schen Goldblattelectroscope begegnet, indem hier die zu bewegende Masse bedeutend vermindert ist. An einem Metalldrahte hangen nämlich 2 schmale Goldblättchen herab; der Draht geht durch den Deckel eines Glasgefäßes, so daß aller Luftzug, welcher eine Bewegung hervorbringen könnte, von den Blättchen abgehalten wird. Am oberen Ende des Drahtes außerhalb des Glases ist eine metallene Kugel oder gewöhnlich eine metallene Platte befestigt, welche den Goldblättchen durch den Draht die Electricität zuführen soll, und deßwegen die Zuleitungs- oder Collectorplatte (collector, Sammler) genannt wird. Der zu untersuchende Körper wird mit der Platte in Berührung gebracht, theilt dieser, falls er electrisch ist, und durch dieselbe den Blättchen Electricität mit. Die Blättchen, welche auf diese Weise gleichnamig electrisch werden, müssen aus einander weichen, und natürlich um so mehr, je stärker die Electricität des zu untersuchenden Körpers war.

§. 63. **Leiter und Nichtleiter der Electricität.** 1) Aendert man den Versuch in §. 60 dahin ab, daß man das Hollundermarkkügelchen statt an einem seidenen Faden an einem leinenen Faden oder an einem feinen

Digitized by Google

Metalldraht aufhängt, so steht man zwar auch Anfangs das Kügelchen von der geriebenen Glasröhre angezogen werden, allein es bleibt jetzt an derselben hangen, und wird nicht wieder abgestoßen. Nimmt man die Glasröhre weg, und nähert ihm dann die Papierschnitzchen, so hat es jetzt auch nicht die Eigenschaft, diese anzuziehen. 2) Hält man eine Glasstange an dem einen Ende, reibt das andere Ende mit einem wollenen oder seidenen Tuche, und nähert dann die Stange in ihren verschiedenen Punkten dem an einem seidenen Faden aufgehangenen Hollundermarkkügelchen, so wird man finden, daß dieses nur von den geriebenen Stellen der Stange angezogen wird. Das Hollundermarkkügelchen dagegen zieht nicht nur an derjenigen Stelle, an welcher es von einem electrischen Körper berührt wurde, die Papierschnitzchen an, sondern an allen Stellen. 3) Wenn man das Kügelchen, nachdem es durch Mittheilung electrisch geworden ist, an irgend einer Stelle mit dem Finger berührt, so hat es die Fähigkeit, leichte Körperchen anzuziehen, an allen Stellen verloren. Wenn man aber eine electrische Glasstange an einer Stelle mit der Hand berührt, so zieht diese Stelle zwar auch keine leichten Körperchen mehr an, alle übrigen Stellen thun dies aber vor wie nach.

Da in dem in 1 mitgetheilten Versuche alle anderen Umstände dieselben sind, wie in dem Versuche in §. 60, so kann die Ursache der Verschiedenheit des Verhaltens nur in der Verschiedenheit des Fadens gesucht werden. Auch jetzt müssen wir annehmen, daß die geriebene Glasröhre dem Kügelchen Electricität mittheilt. Wenn es sich aber dessenungeachtet unelectrisch zeigt, so kann dies keinen anderen Grund haben, als daß ihm die Electricität im Momente der Mittheilung wieder entzogen und fortgeleitet wird. Da sich in der Umgebung des Kügelchens sonst Nichts geändert hat, so kann diese Fortleitung nur durch den leinenen Faden oder durch den Metalldraht geschehen, während der seidene Faden in §. 60 die dem Kügelchen mitgetheilte Electricität nicht durch sich hindurch ließ. Wir stoßen also hier auf ein verschiedenes Verhalten verschiedener Körper zur Electricität, die einen, wie z. B. Seide, pflanzen die Electricität nicht durch ihre Masse fort, die anderen, wie der leinene Faden, der Metalldraht, thun dies mit großer Leichtigkeit. Die ersteren nennt man daher Nichtleiter der Electricität, die letzteren Leiter. Durch Versuche hat man ermittelt, daß zu den Nichtleitern Glas, Harz, Schwefel, thierische Felle, Seide, trockene Luft, Elfenbein, Gutta Percha *) u. a. gehören, daß unter allen Körpern die Metalle die besten Leiter sind, daß zu denselben aber auch die Kohle, sowie fast alle Flüssigkeiten, und deßwegen auch alle feuchten Körper gerechnet werden müssen **). Ein scharfer Gegensatz ist in dieser Beziehung unter den Körpern nicht zu machen, sondern es findet nur ein allmählicher Uebergang statt, weßhalb man auch von Halbleitern spricht, und darunter diejenigen Körper versteht, welchen weder die Eigenschaften der Leiter, noch der Nichtleiter in hohem Grade zukommen. Zu den Halbleitern gehören

*) Im Allgemeinen gehört Gutta Percha zu den vollkommensten Nichtleitern, doch ist nicht alles im Handel vorkommende Gutta Percha hierin gleich. Bei einem gut nichtleitenden Stücke hat die Schnittfläche Harzglanz und eine compacte Beschaffenheit, während sie anderen Falls nicht denselben Grad von Glanz besitzt, sich weniger durchscheinend erweist, und beinahe das Ansehen einer erstarrten trüben Lösung besitzt.

**) Die feuchte Luft ist demnach auch ein Leiter, und daraus erklärt es sich, warum electrische Versuche bei feuchter Witterung so schlecht oder gar nicht gelingen.

Digitized by Google

die meisten Erden und Steine. Jedenfalls ist es richtiger, nur von guten und schlechten Leitern der Electricität zu reden. Aus dem zweiten und dritten Versuch lernen wir dann noch andere Verschiedenheiten zwischen Leitern und Nichtleitern der Electricität kennen. Wir sahen, daß bei den Leitern, wie bei dem Hollundermarkkügelchen, wenn denselben Electricität mitgetheilt wird, diese sich über die ganze Oberfläche verbreitet, daß dagegen Nichtleiter, wie die Glasstange, die Electricität nur an der berührten Stelle empfangen; wir sahen ferner, daß ein electrischer Leiter, wenn er an irgend einer Stelle berührt wird, ganz unelectrisch wird, daß dagegen ein electrischer Nichtleiter nur an der berührten Stelle seine Electricität abgibt.

Da es Anfangs nur gelang, Glas, Harz und einige andere Körper durch Reiben electrisch zu machen, so nannte man, entsprechend wie bei dem Magnetismus, die Körper, bei welchen dies gelang, idioëlectrische (ἴδιος, eigen, eigenthümlich) und die anderen unelectrische. Sobald man aber die Eigenschaften der Leiter hatte kennen gelernt, mußte sich diese Eintheilung als unhaltbar erweisen, da man einsah, daß geriebene Leiter nur deßwegen keine electrischen Erscheinungen zeigen, weil die erregte Electricität sofort wieder durch die Hand und den menschlichen Körper, welche ebenfalls zu den Leitern gehören, fortgeleitet wird. Man weiß jetzt, daß alle Körper ohne Ausnahme electrisch werden können; nur muß man einen Leiter mit Nichtleitern umgeben, wenn dies geschehen soll. Einen Körper mit Nichtleitern umgeben nennt man, ihn isoliren und aus diesem Grunde die Nichtleiter auch Isolatoren.

§. 64. Electricitätserregung durch Vertheilung. 1) An jedem Ende eines auf einem Glasfuße befestigten Metallstabes sei an leinenen Fäden oder Metalldrähten ein Paar Hollundermarkkügelchen aufgehängt. Wenn man nun dem einen Ende einen electrischen Körper, etwa eine geriebene Glasröhre, nähert, so gehen die Kügelchen an beiden Enden aus einander. Sobald man aber den electrischen Körper entfernt, fallen sie wieder zusammen. 2) Nimmt man ein Probescheibchen (man versteht darunter ein kleines Scheibchen von Rauschgold oder Goldpapier, das an einem langen, ganz dünnen, übersirnißten Glasstäbchen befestigt ist), berührt damit das dem electrischen Körper genäherte Ende des Metallstabes, um ihm Electricität von demselben mittheilen zu lassen, und untersucht dann an dem electrischen Pendel, welche Electricität es empfangen habe, so findet man die entgegengesetzte Electricität von derjenigen des genäherten electrischen Körpers. Verfährt man ebenso an dem anderen Ende, so zeigt dieses Ende dieselbe Electricität, wie der genäherte Körper. 3) Hängt man solche Pendelpaare nicht blos an den Enden des Metallstabs, sondern auch an anderen Stellen desselben auf, so divergiren sie zwar alle, aber doch desto mehr, je weiter nach den Enden zu sie hängen. 4) Berührt man das entferntere Ende mit dem Finger, so fallen hier die Hollundermarkkügelchen zusammen, während diejenigen am anderen Ende desto mehr divergiren. Nimmt man dann den Metallstab aus der Nähe des electrischen Körpers, und untersucht ihn in Beziehung auf seinen electrischen Zustand, so ergibt sich, daß er jetzt in seiner ganzen Ausdehnung dieselbe Electricität zeigt, und zwar diejenige, welche früher an dem genäherten Ende beobachtet wurde.

Aus 1 ersehen wir, daß der electrische Zustand in einem Körper nicht

Digitized by Google

blos durch Berührung mit einem electrischen Körper, sondern schon durch die Annäherung eines solchen hervorgerufen werden kann. Weil aber die Kügelchen bei der Entfernung des electrischen Körpers wieder zusammenfallen und der electrische Zustand wieder verschwindet, so kann keine Mittheilung der Electricität stattfinden. Dies kann auch um so weniger angenommen werden, weil nach 2 an den beiden Enden des Metallstabs nicht dieselbe Electricität, sondern stets die entgegengesetzten gefunden werden. Auf welche Weise wirkt nun aber der genäherte electrische Körper? Die Erscheinungen erklären sich vollständig, wenn man, wie schon oben angegeben wurde, annimmt, daß in dem unelectrischen Zustande beide Electricitäten in den Körpern gleichmäßig vertheilt sind. Denn wenn dann ein electrischer Körper genähert wird, so muß derselbe die ungleichnamige Electricität nach sich hinziehen, die gleichnamige dagegen abstoßen. Da aber der Metallstab isolirt ist, so kann diese nicht entweichen, sondern häuft sich an dem entfernteren Ende an. Aus der Anhäufung an beiden Enden erklärt sich dann auch, warum, wenn mehrere Pendelpaare aufgehangen sind, diejenigen an den beiden Enden am weitesten divergiren, während die Abweichung nach der Mitte des Metallstabs zu immer mehr abnimmt. Wenn nun in dem vierten Versuche das eine Ende des Metallstabs mit dem Finger berührt wird, so wird dadurch die daselbst angehäufte Electricität fortgeführt, während diejenige am anderen Ende durch die fortdauernde Einwirkung des electrischen Körpers zurückgehalten wird. Wird dieser dann entfernt, so verbreitet sich die an dem Ende angehäuft gewesene Electricität über den ganzen Metallstab, weßhalb er jetzt überall gleichnamig electrisch ist. Der ganze Vorgang erinnert an die in §. 43 erwähnten magnetischen Erscheinungen. Auch hier nennt man deßhalb diese Art, die Electricität hervorzurufen, die *electrische Vertheilung*, wenn wir gleich gesehen haben, daß die Vertheilung der beiden magnetischen Flüssigkeiten eine andere ist, als die der beiden Electricitäten. Aehnlich wie bei dem Magnetismus wird man jetzt nicht mehr sagen können, ein electrischer Körper ziehe einen unelectrischen an, sondern man wird sich denken müssen, daß er bei seiner Annäherung in dem unelectrischen eine Vertheilung bewirke, die ungleichnamige Electricität nach sich hin ziehe, und daß sich dann die beiden entgegengesetzten Electricitäten einander anziehen. Der Raum, innerhalb welches ein electrischer Körper in anderen Körpern eine Vertheilung hervorbringt, wird seine *electrische Atmosphäre* genannt.

Wendet man als Körper, in welchem die Vertheilung bewirkt werden soll, einen Nichtleiter an, so wird man finden, daß die Vertheilung nicht so leicht erfolgt, daß sie aber, wenn sie einmal erfolgt ist, bei Entfernung des electrischen Körpers nicht augenblicklich verschwindet, sondern immer einige Zeit andauert, ein Verhalten, das uns an die Coërcitivkraft des Stahls und den dauernden Magnetismus desselben erinnert, während weiches Eisen den in ihm erregten Magnetismus immer sogleich wieder verliert.

Durch die Vertheilung ist uns auch ein Mittel gegeben, wie man mittelst des Bennet'schen Goldblattelectroscopes nicht nur finden kann, ob ein Körper überhaupt electrisch, sondern auch ob er positiv oder negativ electrisch ist. Man berührt nämlich mit dem zu untersuchenden Körper die Collectorplatte, bis die Goldblättchen divergiren. Nachdem man ihn dann entfernt hat, nähert man der Platte einen Körper, dessen Electricität man

Digitized by Google

kennt. Fallen die Goldblättchen zusammen, oder nimmt ihre Divergenz wenigstens ab, dann hatte der zu untersuchende Körper die entgegengesetzte Electricität; nimmt aber die Divergenz zu, dann hatte er die gleichnamige Electricität. Im ersteren Falle wird die über die Platte, den Stab und die Goldblättchen verbreitete Electricität nach der Platte hin-, also von den Goldblättchen weggezogen, im letzteren aber wird sie von der Platte zurück nach den Goldblättchen hingetrieben.

§. 65. **Beide Electricitäten werden stets zu gleicher Zeit erregt.** 1) Untersucht man das seidene Tuch, mit welchem man eine Glasröhre gerieben, und dadurch electrisirt hat, so findet man, daß dieses ebenfalls electrisch ist. Bestimmt man auch noch, was für Electricität es besitze, so zeigt es negative Electricität. Wenn man den Versuch mit der Wolle anstellt, mit welcher eine Harzstange gerieben wurde, so wird sie positiv electrisch gefunden. 2) Reibt man Glas mit einem Katzenfelle oder Fuchsschwanze, so ist auch dieser electrisch, aber positiv, während jetzt das Glas sich negativ electrisch erweiset. 3) Man nehme statt polirten Glases mattgeschliffenes Glas, und reibe es mit Seide, so ist wiederum das Glas negativ electrisch, während jetzt die Seide positive Electricität zeigt.

Aus diesen Versuchen lernen wir zunächst, daß nie eine Electricität für sich allein auftritt, daß nicht nur der geriebene Körper electrisch wird, sondern auch der reibende, und daß dieser letztere die entgegengesetzte Electricität des ersteren annimmt. Wenn wir ferner früher schon gesehen haben, daß von der Natur des geriebenen Körpers es abhängt, ob er durch Reiben positiv oder negativ electrisch wird, so lernen wir aus dem zweiten Versuche, daß auch der reibende Körper, und aus dem dritten Versuche, daß selbst die Beschaffenheit der Oberfläche des geriebenen Körpers in dieser Beziehung einen wichtigen Einfluß ausübt. Da wir nach dem vorhergehenden §. annehmen müssen, daß in jedem Körper im natürlichen Zustande beide Electricitäten vorhanden sind, so kann es auch weiter gar Nichts Auffallendes haben, wenn wir ein und denselben Körper unter verschiedenen Umständen bald diese, bald jene Electricität annehmen sehen.

§. 66. **Die Electrisirmaschine.** Die bisher angegebenen Mittel, Electricität durch Reiben zu erregen, waren sehr einfach, die durch dieselben hervorgebrachten Wirkungen nur klein. Man hat daher Apparate erdacht, welche gestatten, durch Reibung größere Mengen von Electricität zu erregen, und dadurch auch größere Wirkungen zu erzielen. Solche Apparate führen den Namen Electrisirmaschinen. Sie bestehen alle bei großer Verschiedenheit der Construction aus drei Haupttheilen, nämlich 1) einem nichtleitenden Körper, welcher gerieben wird, zu welchem am häufigsten eine um eine horizontale Axe vermittelst einer Kurbel drehbare Glasscheibe genommen wird, dem Reiber, 2) dem Reibzeug, welches gewöhnlich lederne Kissen sind, welche mit einem Amalgam, am besten aus 1 Th. Zinn, 1 Th. Zink und 2 Th. Quecksilber (dem Kienmayer'schen Amalgame) bestehend, bestrichen, und durch Federn gegen die Glasscheibe gepreßt werden, 3) dem Conductor (Zusammenführer), der die Bestimmung hat, die durch die Reibung erregte Electricität aufzunehmen und auf seiner Oberfläche anzusammeln. Der Conductor ist gewöhnlich ein gut isolirter (auf einem Glasfuße ruhender), sorgfältig polirter und abge-

Digitized by Google

rundeter, hohler cylinder- oder kugelförmiger Körper von Messingblech (oder einem anderen guten Leiter der Electricität). Er ist in der Regel nach der Scheibe zu mit Armen versehen, welche ihm die erregte Electricität der Glasscheibe zuführen, und deßwegen Zuleiter genannt werden. Soll die positive Electricität der Glasscheibe in dem Conductor angesammelt werden, so müssen die Reibkissen mit der Erde in eine leitende Verbindung gebracht werden. Denn beim Reiben wird nicht nur positive Electricität auf der Scheibe, sondern, wie wir gesehen haben, zugleich negative Electricität auf den Kissen erregt. Wird nun der negativen Electricität keine Ableitung dargeboten, so ziehen beide ungleichnamigen Electricitäten einander an, und wirken ihrer Trennung entgegen; ja es würde auf den Kissen nach und nach eine solche Anhäufung negativer Electricität erfolgen, daß sie theilweise auf die Glasscheibe überströmen, und dort die erregte positive Electricität wieder neutralisiren würde. Da die Luft niemals vollkommen trocken ist, und deßhalb je nach ihrem Feuchtigkeitsgehalte die erregte Electricität mehr oder weniger ableiten würde, so behängt man zur Verhinderung dieses Uebelstandes die Scheibe zwischen den Kissen und den Zuleitern mit Stücken von Wachstaffent (einem Nichtleiter). Die vollkommneren Electrisirmaschinen haben noch die Einrichtung, daß man auch die negative Electricität des Reibzeugs in einem Conductor ansammeln kann. Bei solchen Maschinen muß dann jedenfalls das Reibzeug isolirt sein. Sie haben noch einen besonderen zweiten Conductor für das Reibzeug, der mit der Erde in leitende Verbindung gesetzt wird, wenn in dem anderen Conductor die Electricität der Scheibe angesammelt werden soll, während der letztere mit der Erde leitend verbunden werden muß, wenn dem ersteren die negative Electricität der Reibkissen zugeführt wird. Bei der van Marum'schen Maschine erreicht man denselben Zweck, nach Belieben bald die positive Electricität der Scheibe, bald die negative des Reibzeuges ansammeln zu können, mit einem einzigen Conductor. Die Zuleiter des Conductors sind um eine horizontale Axe drehbar, und ihnen ganz entsprechend lassen sich auch auf der anderen Seite der Scheibe um die Axe derselben 2 andere Arme von Messingblech drehen, welche mit der Erde in leitende Verbindung gesetzt sind. Legt man die letzteren auf die Reibkissen, so erhält man in dem Conductor die Electricität der Scheibe; legt man aber die Zuleiter des Conductors auf die Reibkissen auf, während die anderen Arme so gestellt werden, daß sie die Electricität der Scheibe aufnehmen und nach dem Boden abführen können, so erhält man in dem Conductor die Electricität des Reibzeugs.

Wenn öfter auch die Erfindung der Electrisirmaschine dem Otto von Guerike zugeschrieben wird, so muß dagegen bemerkt werden, daß sein Apparat, eine Schwefelkugel, welche auf einem hölzernen Gestell mit einer Kurbel umgedreht wird, den Namen einer Electrisirmaschine nicht verdient, da er von den 3 wesentlichen Bestandtheilen einer solchen nur den einen, den Körper, der gerieben wird, hatte, während ihm Reibzeug und Conductor fehlten. Electrisirmaschinen mit allen 3 Haupttheilen sind erst gegen die Mitte des 18. Jahrhunderts construirt worden.

Eine ganz neue Art von Electrisirmaschinen, die s. g. Dampfelectrisirmaschinen, oder, wie sie von ihrem Erfinder genannt wurden, Hydroëlectrisirmaschinen (ὕδωρ, Wasser), wurde im Jahre 1840

Digitized by Google

von dem Engländer Armstrong erfunden. Sie zeichnen sich vor den älteren Maschinen ganz besonders dadurch aus, daß sie in kurzer Zeit verhältnißmäßig eine sehr große Electricitätsmenge liefern. Es sind isolirte, auf Glasfüßen ruhende Dampfkessel, welche von Innen geheizt werden, und aus welchen die entwickelt werdenden Wasserdämpfe durch eine Verbindung mehrerer Röhren entweichen können. Der ausströmende Dampf und die durch denselben fortgerissenen, bereits schon in den Röhren condensirten Wassertheilchen sind der geriebene Körper, die Röhren das Reibzeug, und der Dampfkessel der Conductor, und zwar hier Conductor des Reibzeugs. Um eine kräftige Reibung zu erzielen, muß dem Dampfe vor seinem Ausströmen eine hohe Spannung ertheilt werden. Man wendet deßhalb gewöhnlich Dampf von einer Spannkraft von 5 bis 6 Atmosphären an. Wenn man aber die Electricität des Reibzeugs in dem Conductor ansammeln will, so muß man ja, wie wir gesehen haben, die Electricität des geriebenen Körpers, hier des ausströmenden Dampfes, ableiten. Es geschieht dies dadurch, daß man in den Dampfstrom eine Reihe von Metallspitzen stellt, welche an einem messingenen Stabe befestigt sind, und durch denselben mit dem Boden in leitender Verbindung stehen. Untersucht man die Natur der hier entwickelten Electricitäten, so findet man den ausströmenden Dampf positiv, den Kessel dagegen negativ electrisch.

Um die uns schon bekannte electrische Anziehung und Abstoßung vermittelst der Electrisirmaschine zu zeigen, hat man verschiedene unterhaltende Spielereien erdacht, wie z. B. den electrischen Puppentanz, das electrische Glockenspiel u. a. Auch erklärt sich aus derselben, warum ein Büschel Baumwolle, auf den Conductor gelegt, aufschwillt, denn da die einzelnen Fäden alle gleichnamige Electricität mitgetheilt erhalten, so müssen sie sich gegenseitig abstoßen.

§. 67. **Electrische Spannung, electrischer Strom; Henley's Quadrantenelectrometer.** Daß die von einem electrischen Körper hervorgebrachten Wirkungen desto größer sind, je mehr freie Electricität auf demselben angehäuft ist, bedarf keines Beweises; ebenso wenig, daß man auch umgekehrt aus den auf eine gewisse Entfernung hervorgebrachten Wirkungen auf die Menge der vorhandenen freien Electricität zurückschließen dürfe. Wird nicht nur die Menge der Electricität berücksichtigt, sondern zugleich die Größe der Fläche, über welche sie verbreitet ist, so erhält man den Begriff der Dichte der Electricität. Je größer die Dichte ist, desto näher sind also die Theilchen gleichnamiger Electricität bei einander, desto größer ist daher ihr Bestreben, sich gegenseitig abzustoßen, und dadurch auch ihr Bestreben, sich mit der ungleichnamigen Electricität der Umgebung zu vereinigen. Den gezwungenen Zustand, in welchem sie sich dann befinden, nennt man die electrische Spannung, die demnach um so größer ist, je größer die Dichte der Electricität ist *). Da die Electricität in diesem Zustande gewisser Maßen an den Körper gebunden ist, ihn nicht verlassen kann, so betrach-

*) Aus dem oben Gesagten erklärt sich nun auch, warum bei länglichen Conductoren der Electrisirmaschinen die Wirkungen an den Enden derselben stets am stärksten sind, während kugelförmige Conductoren diesen Unterschied nicht zeigen. Dem Conductor wird nämlich von der Scheibe stets gleichnamige Electricität mitgetheilt, die Theilchen derselben stoßen sich aber gegenseitig ab, und werden dadurch nach den Enden hingedrängt; bei der Kugel ist aber überall Ende.

Digitized by Google

tet man diesen Zustand als einen Zustand des Gleichgewichts, und nennt deßhalb die Electricität in diesem Zustande statische Electricität (στατός, stehend, ruhend). Sobald ein Körper, welcher sich in diesem electrischen Zustande befindet, mit einem Leiter zusammenkommt, ist der Electricität die Möglichkeit gegeben, in den natürlichen Zustand zurückzukehren, indem die ungleichnamigen Electricitäten des electrischen Körpers und des Leiters sich mit einander vereinigen. Der Act dieser Ausgleichung, bei welchem der electrische Zustand sich von dem einen Theilchen zu dem andern fortpflanzt, heißt der electrische Strom, und da man sich bei demselben die Electricität in dem Zustande der Bewegung denken muß, so heißt sie in diesem Falle dynamische Electricität (δύναμις, Kraft; eine Bewegung wird nur durch Einwirkung einer Kraft hervorgebracht). Die Vereinigung der beiden ungleichnamigen Electricitäten, oder das gegen einander Strömen derselben, findet oft schon dann statt, wenn die beiden Körper noch durch eine nichtleitende Schicht von einander getrennt sind, und beurkundet sich durch den mit einem Geräusche verbundenen electrischen Funken (§. 59). Die trennende Schicht kann natürlich desto dicker sein, je größer die Spannung ist; daraus erklärt sich, warum aus dem Conductor einer Electrisirmaschine viel längere Funken erhalten werden, als aus einer geriebenen Glasröhre. Die Entfernung, bis zu welcher Funken überspringen, nennt man die Schlagweite, und beurtheilt nach derselben die Wirksamkeit einer Electrisirmaschine. An den Funken einer Electrisirmaschine beobachtet man, daß er nicht eine grade Linie, sondern ein Zickzack bildet (§. 120).

Um den Grad der Spannung in dem Conductor einer Electrisirmaschine zu beurtheilen, dient das Henley'sche Quadrantenelectrometer. Es besteht aus einem messingenen Säulchen, welches auf den Conductor befestigt werden kann, und an seinem oberen Ende einen verticalen, in Grade eingetheilten Quadranten von Elfenbein trägt. In dem Mittelpunkt des Quadranten ist an dem Säulchen ein leichtes, bewegliches Holz- oder Fischbeinstäbchen befestigt, an dessen unterem Ende ein Kork- oder Hollundermarkkügelchen angebracht ist. Sowie dem Conductor Electricität zugeführt wird, gelangt diese auch in das Säulchen und das Kügelchen, und da nun beide gleichnamig electrisch werden, so wird das Kügelchen, weil es beweglich ist, abgestoßen, und zwar je größer die Spannung, desto mehr. Die Versuche mit diesem Electrometer lehren nun, daß es, wenn man anfängt, die Scheibe zu drehen, rasch steigt, aber bald eine Stellung erreicht, in welcher es verharret, wenn auch die Scheibe fort und fort gedreht wird. Daraus geht hervor, daß die electrische Spannung des Conductors nicht über einen gewissen Punkt gebracht werden kann, und daß demnach alle ihm noch weiter zugeführte Electricität wieder an die Umgebung verloren geht, sowie daß dieser Verlust mit der Vermehrung der Spannung wächst.

§. 68. **Wie wirken die electrischen Kräfte in die Ferne? Coulomb'sche Drehwage.** Auf einem Glasfuße ist eine hohle messingene Kugel befestigt, die etwas zur Seite ein größeres, rundes Loch hat. Dieser Kugel werde Electricität mitgetheilt, und, nachdem dies geschehen, hänge man ein an einem seidenen Faden befestigtes Hollundermarkkügelchen in die Kugel hinein. Da die Oeffnung zur Seite angebracht ist, so ist das Hollundermarkkügelchen jedenfalls an einer Stelle der Oberfläche näher, als an der gegenüber liegenden Stelle. Oeffenungeachtet bleibt das Kügelchen ruhig

Digitized by Google

hangen, und wird nicht von dem näheren Theile der Kugelfläche angezogen, wie man doch erwarten sollte.

Fig. 11.

Daß das Kügelchen a (Fig. 11) ruhig hängen bleibt, kann nur die Folge davon sein, daß es nach allen Richtungen hin gleich stark angezogen wird, es müssen demnach die ähnlichen Stücke b c und b′c′ der Kugelfläche auf a eine gleiche Wirkung ausüben. Gesetzt die Fläche b c sei n mal näher an a, als die Fläche b′ c′, dann ist die Fläche b c n^2 mal kleiner, als b′c′. Da nun die Electricität sich über eine Kugelfläche gleichmäßig verbreitet, so ist also auf b′ c′ eine n^2 mal größere Menge Electricität, als auf b c, sie sollte demnach auch eine n^2 mal größere Wirkung auf a ausüben, wenn die Entfernungen beider Flächen von a einander gleich wären. Die Wirkungen sind aber einander gleich, folglich muß durch die n fache Entfernung die Wirkung n^2 mal schwächer geworden sein, oder es muß das Gesetz gelten, daß die Wirkungen der electrischen Kräfte im umgekehrten Verhältniß mit den Quadraten der Entfernung stehen. Dieses wichtige Gesetz läßt sich noch schärfer und bestimmter durch die Coulomb'sche Drehwage nachweisen. Die Drehwage ist 1777 von Coulomb erfunden und bestimmt, sehr kleine Kräfte des Stoßes, der Anziehung, Abstoßung u. d. gl. zu messen. Sie beruht auf folgendem Principe. Bringt man die Theile eines elastischen Drahtes oder Fadens, welcher durch einen daran gehängten Körper, z. B. durch ein horizontales Stäbchen, gradlinig gespannt ist, aus dem Gleichgewichtszustande, indem man den Faden um seine Längenare dreht, so geräth das Stäbchen in pendelartige Schwingungen. Hieraus folgt, daß die durch die Drehung geweckte Elasticität, welche die Ursache dieser Schwingungen ist, mit dem durch die Ausweichung des Stäbchens angezeigten Drehungswinkel des Fadens in grabem Verhältniß stehen müsse (§. 15). Wird daher das Stäbchen nach und nach durch Kräfte aus der natürlichen Gleichgewichtslage, in welcher die Torsion des Fadens oder Drahtes gleich Null ist, in andere Gleichgewichtslagen versetzt, so verhalten sich diese Kräfte grade wie die entsprechenden Torsionen des Fadens. Der Apparat hat zu diesem Zwecke folgende Einrichtung. Er besteht aus einem weiten, gläsernen Cylinder, mit einer Messingplatte bedeckt, auf welcher ein engerer, aber längerer gläserner Cylinder aufgerichtet steht. Die Cylinder haben nur den Zweck, die störenden Luftströmungen abzuhalten. An der oberen Fassung des engen Cylinders ist ein horizontales Stäbchen angebracht, um welches das eine Ende des feinen Metalldrahtes gewunden ist, und durch dessen Drehung er mehr auf- oder abgewunden werden kann. Am anderen Ende trägt der Draht eine horizontal schwebende, dünne Nadel von Schellack, welche an dem einen Ende ein Scheibchen von Rauschgold oder auch ein Hollundermarkkügelchen trägt. Die Schellacknadel spielt über einem an der Oberfläche des weiten Cylinders angebrachten, in Grade getheilten Kreise. Ein anderer eingetheilter Kreis ist an der obern Fassung des engeren Cylinders, über welchem ein mit dem Drahte verbundener Zeiger spielt. Beide Kreise sind so gestellt, daß, wenn der Zeiger auf 0° des kleinen Kreises zeigt, das Scheibchen Rauschgold auch der Null des größeren Kreises gegenüber steht. In dem

Digitized by Google

Deckel des größeren Cylinders ist noch seitwärts eine kleine Oeffnung so angebracht, daß durch dieselbe ein Probescheibchen eingesenkt und genau der Null des unteren Kreises gegenübergebracht werden kann. Soll die Drehwage für Messungen magnetischer Anziehungen und Abstoßungen gebraucht werden, so ist die Schellacknadel durch einen prismatischen oder cylindrischen, horizontal schwebenden Magnet ersetzt, im Uebrigen aber ganz ähnlich eingerichtet. Um die Richtigkeit des besprochenen Gesetzes zu untersuchen, verfuhr Coulomb folgender Maßen. Er senkte ein electrisirtes Probescheibchen ein, dieses machte durch Berührung das Scheibchen Rauschgold gleichnamig electrisch, weßwegen jetzt letzteres abgestoßen wurde, und zwar so stark, daß die Schellacknadel einen Winkel von 36° beschrieb. Hierauf drehte er den Draht gegen die Ordnung der Zahlen, bis die Nadel nur noch um 18° von dem Nullpunkt abstand, und fand, daß dies erst der Fall war, als er den Draht um 126° gedreht hatte. In der Entfernung von 36° entspricht also die electrische Kraft einer Drehung des Fadens von 36°, in der Entfernung von 18° aber einer Drehung von 126°+18° oder von 144°. Die Wirkung der electrischen Kraft in beiden Entfernungen verhielt sich also, wie 36:144 oder wie 1:4; die Entfernungen verhielten sich aber wie 2:1, wodurch demnach das obige Gesetz seine volle Bestätigung fand.

§. 69. **Noch andere durch den electrischen Zustand bedingte Erscheinungen.** Die electrischen Erscheinungen, von welchen wir bisher gesprochen haben, waren hauptsächlich mechanische, sich durch Bewegung kundgebende, die sich als Anziehungen oder Abstoßungen darstellten, je nachdem 2 ungleichnamig oder 2 gleichnamig electrische Körper auf einander einwirken. Außerdem haben wir in dem electrischen Funken ein Lichtphänomen kennen gelernt. Als zu den ersteren, zu den mechanischen Erscheinungen gehörig erwähnen wir jetzt noch folgende: 1) Wenn man einen Menschen auf den Isolirschämel (ein Brett, das auf gläsernen Füßen ruht) stellt, und ihn mit dem Conductor in leitende Verbindung bringt, so sträuben sich die Haare seines Kopfes empor. Der Versuch beweist, daß der menschliche Körper ein Leiter der Electricität ist, weil die Electricität vom dem Conductor bis zu den äußersten Extremitäten, den Haaren, vordringt. Daß die Haare sich emporsträuben, ist nur Folge davon, daß die einzelnen gleichnamig electrisch geworden sind, und sich also gegenseitig abstoßen. 2) Wenn man eine Metallspitze an den Conductor befestigt, so verliert er in kurzer Zeit alle seine Electricität. Da dem Conductor stets nur gleichnamige Electricität mitgetheilt wird, so häuft sich die Electricität wegen der gegenseitigen Abstoßung der gleichnamigen Electricität nur an den äußersten Enden an, und die Anhäufung wird dort um so größer, je kleiner die Fläche des Endes ist, also bei einer Spitze wegen der Kleinheit der Fläche ganz besonders groß. Dadurch wächst auch die electrische Spannung in so hohem Grade, daß die Electricität in die umgebende Luft ausströmt. Zugleich lernen wir aus dem Versuche, daß man bei Anfertigung der Conductoren ja alle Spitzen vermeiden, und auf gute Abrundung der Grenzfläche sehen müsse. 3) Hält man eine brennende Kerze gegen die Spitze, so sieht man, wie die Flamme seitlich abgelenkt wird; hält man die flache Hand über die Spitze, so hat man dasselbe Gefühl, als wenn ein Luftzug gegen die Hand stattfindet. 4) Die electrische Sichel oder das electrische Flugrad (man versteht darunter ein S förmig gebogenes Metall-

Digitized by Google

stäbchen, welches mittelst eines Hütchens auf einer Spitze ruht, und sich leicht um die Spitze drehen läßt) geräth, wenn die Spitze auf dem electrisirten Conductor befestigt worden ist, in eine schnelle drehende Bewegung, welche der Richtung der Spitzen der Sichel entgegengesetzt ist. Der dritte und vierte Versuch geben nur noch eine neue Bestätigung für die Erklärung des zweiten Versuchs. 5) Wenn man auf einen Harzkuchen einen kleinen electrischen Funken schlagen läßt, und bestreut dann die Harzfläche mit Bärlappsaamen, so zeigt sich da, wo der Funken die Harzfläche getroffen hat, entweder eine strahlige Figur, oder eine Figur, welche aus mehreren concentrischen Ringen besteht, je nachdem man einen Funken positiver oder negativer Electricität auf den Harzkuchen hat überschlagen lassen. Die Figuren entstehen auf die Weise, daß der Bärlappsaamen von einigen Stellen abgeworfen wird, von anderen nicht. Diese schönen Figuren werden nach ihrem Entdecker Lichtenberg'sche Figuren genannt, und sind uns besonders deßwegen interessant, weil sie uns eine neue Verschiedenheit in dem Wesen der beiden Electricitäten kennen lehren.

Als fernere Lichtphänomene erwähnen wir noch folgende: 1) Aus allen Theilen eines Menschen, welcher auf einem Isolirschämel steht, lassen sich durch Annäherung eines electrischen Leiters electrische Funken ziehen, zum weiteren Beweis, daß ein solcher Mensch vermöge seines Leitungsvermögens nur eine Fortsetzung des Conductors geworden ist. 2) An der an dem Conductor befestigten Metallspitze erscheint im verfinsterten Zimmer ein größerer oder kleinerer Strahlenbüschel, je nachdem dem Conductor positive oder negative Electricität zugeführt worden ist, ein Verhalten, aus dem wir abermals auf eine Verschiedenheit in dem Wesen der beiden Electricitäten zu schließen genöthigt werden. Aehnliche Erscheinungen beobachtet man auch, wenn man dem electrisirten Conductor eine Metallspitze nähert. 3) Wenn im Finstern eine Electrisirmaschine gedreht wird, so gewahrt man fortdauernd ein electrisches Licht zwischen dem Reiber und den Zuleitern, und auch zwischem dem Reiber und dem Reibzeug. 4) In verschiedenen Gasen hat der electrische Funke auch eine verschiedene Farbe; so ist er in der atmosphärischen Luft und im Stickstoffgas blau und hell, dagegen im Wasserstoffgase carmoisinroth und schwach leuchtend. 5) Wenn in einer an beiden Enden mit Metallfassungen versehenen Glasröhre die Luft stark verdünnt worden ist, und man dann das eine Ende dem Conductor einer Electrisirmaschine nähert, während man das andere in der Hand hält, und dadurch mit dem Boden in leitende Verbindung setzt, so bemerkt man in dem Innern der Röhre ein lebhaftes Leuchten von blauröthlichem Lichte, welches oft die ganze Röhre erfüllt. Wir lernen daraus, daß die verdünnte Luft der Ausgleichung der beiden Electricitäten einen viel geringeren Widerstand entgegensetzt, als die Luft bei gewöhnlicher Dichte. 6) Wenn man eine Glasröhre zum Theil mit Queckſilber füllt, aus dem übrigen Theil die Luft austreibt, und dann die Röhre zuschmilzt, so gewahrt man, wenn man im Finstern das Queckſilber in der Röhre auf und ab laufen läßt, jedes Mal sobald das Queckſilber auf das eine Ende aufschlägt, einen Lichtblitz. Es ist dies jedenfalls auch electrisches Licht, welches durch die Reibung des Queckſilbers an den Wänden der Glasröhre hervorgerufen wird. Das Licht wird aber nur an den Enden der Glasröhre beobachtet, weil da das Queckſilber mit größerer Gewalt aufschlägt, also

Digitized by Google

die Reibung stärker ist. 7) Wenn der Leiter, durch welchen die Electricität abgeleitet wird, an verschiedenen Stellen unterbrochen ist, so muß natürlich an jeder Unterbrechung ein electrischer Funken sich zeigen, Blitztafel, Blitzkette und andere artige Spielereien.

§. 70. **Fortsetzung.** Aber die Electricität bringt nicht blos mechanische Wirkungen und Lichterscheinungen hervor, sondern sie veranlaßt auch Wärme-Erregung, wie aus folgenden Versuchen hervorgeht: 1) Wenn man durch eine Kugel eines Differentialthermometers einen dünnen Metalldraht so anbringt, daß ein electrischer Funken hindurch geleitet werden kann, so erfolgt eine Ausdehnung der Luft in dem Augenblicke, in welchem die Electricität durch den Draht geht. 2) Wenn man dem Conductor in einer metallenen Schale, etwa einem silbernen Löffel, Schwefeläther oder einen anderen, leicht entzündlichen Körper nähert, so wird durch den überschlagenden Funken der Schwefeläther flammend entzündet; Donnerhaus. 3) Knallgas wird durch den electrischen Funken entzündet und verbrennt mit Explosion. Electrische Pistole, electrische Kanone, Volta's Eudiometer, die electrischen Zündmaschinen.

Ferner bringt die Electricität auch physiologische Wirkungen hervor, indem durch sie auf mannigfache Weise auf lebende Organismen eingewirkt wird. Dahin sind zu rechnen: 1) Der stechende Schmerz, welchen man empfindet, wenn der Funke auf einen Theil des Körpers überspringt. 2) Wenn man die flache Hand dem Conductor oder der Scheibe nähert, so hat man das Gefühl, als ob man in ein Spinngewebe griffe (wohl dadurch hervorgebracht, daß die kleinen feinen Härchen der Hand von der Electricität angezogen und dann abgestoßen werden). 3) Wenn man die Electricität durch eine metallene Spitze auf die Zunge strömen läßt, so hat man einen eigenthümlichen Geschmack. 4) Wenn die Maschine einige Zeit in Thätigkeit gewesen ist, namentlich aber wenn die Electricität aus Spitzen ausströmt, so verbreitet sich ein charakteristischer, an schweflige Säure oder Phosphor erinnernder Geruch, der nach den Untersuchungen von Schönbein von der Bildung einer eigenthümlichen Substanz, der er den Namen Ozon gegeben, herrühren soll. Bis jetzt ist es noch nicht gelungen, das Ozon isolirt darzustellen. Schönbein hält es für ein Wasserstoffüberoxyd, indem die Electricität den Wasserdampf der Atmosphäre disponire, sich höher zu oxydiren, wodurch das Ozon gebildet werde. Nach dieser Ansicht müßte also der Ozongeruch nicht zu den physiologischen Wirkungen der Electricität gerechnet werden, sondern zu den chemischen, von welchen sogleich noch geredet werden soll.

Noch andere chemische Wirkungen sind folgende: 1) Hält man einer auf den Conductor aufgesetzten Spitze ein Stückchen Papier, welches mit Jodkaliumkleister bestrichen ist, in einer Entfernung von ½ bis 1 Zoll entgegen, so wird der Kleister bald gebläut. Hier ist offenbar das Jodkalium zersetzt worden, und das Jod hat sich mit der Stärke des Kleisters zu Jodstärke, wie an der blauen Färbung erkannt wird, verbunden. Doch pflegt man sich den Hergang so zu erklären, daß die aus der Spitze ausströmende Electricität erst Ozon erzeugt, und dieses dann die Zersetzung des Jodkaliums und die Bildung der Jodstärke vermittelt. 2) Verbindet man zwei sehr feine, in gläserne Haarröhrchen eingeschmolzene Platindrähte, deren kaum sichtbare Enden in einem mit Wasser gefüllten Glasrohr nur

Digitized by Google

wenig von einander abstehen, mit dem Conductor und dem Reibzeug, so scheidet sich an dem Drahte, der mit dem positiv electrischen Körper in Verbindung ist, Sauerstoff-, an dem anderen Wasserstoffgas aus. Auch bei diesem Versuch wird der Ozongeruch wahrgenommen, aber bei genauerer Untersuchung nur an dem Drahtende, an welchem der Sauerstoff ausgeschieden wird. 3) Bringt man ein Stück Lackmuspapier, verbunden mit einem Streifchen Curcumapapier, beide mit Glaubersalzlösung befeuchtet, zwischen zwei Platindrähte, von welchen der eine mit dem Conductor der Electrisirmaschine, der andere mit dem Reibzeug in leitender Verbindung steht, so zeigen sich schon nach einigen Umdrehungen der Scheibe an der Eintrittsstelle der positiven Electricität, wo sich das Lackmuspapier befinden muß, Spuren von Säure, indem das Lackmuspapier geröthet wird, und an der Eintrittsstelle der negativen Electricität Spuren von Alkali, indem das gelbe Curcumapapier gebräunt wird; das Glaubersalz ist also in seine Bestandtheile Schwefelsäure und Natron zerlegt worden.

Endlich müssen noch magnetische Wirkungen erwähnt werden. Denn wenn nach Faraday das eine Ende des Multiplicators (§. 96) mit dem Conductor einer starken Electrisirmaschine, das andere aber mit der Erde leitend verbunden wird, so weicht, sobald die Maschine in Thätigkeit gesetzt wird, die Nadel des Multiplicators ab.

Fassen wir die Ergebnisse dieses und des vorhergehenden §. noch einmal zusammen, so sehen wir durch die Reibungselectricität der Electrisirmaschine mechanische Wirkungen, Licht- und Wärmewirkungen, die man wohl auch unter dem Namen physicalische Wirkungen zusammenfaßt, physiologische, chemische und magnetische Wirkungen hervorgebracht werden.

§. 71. **Apparate, welche auf der electrischen Vertheilung beruhen; Franklin'sche Tafel.** 1) Wenn man eine Glasplatte auf beiden Seiten bis auf 1 oder 1½ Zoll vom Rande mit einem Electricitätsleiter, etwa mit Stanniol oder mit dünnen Messingplatten belegt, und theilt der einen Seite die Electricität des Conductors mit, während die andere Seite mit der Erde in leitender Verbindung steht, so sieht man, sobald man beide Seiten des Belegs durch einen Metalldraht leitend mit einander verbinden will, einen lebhaften Funken, der von einem Knalle begleitet ist. Die Wirkung ist um so größer, je größer die Metallflächen des Belegs und damit auch die Glasplatte, und je größer die Spannung der Electricität in dem Conductor ist. 2) Oft geschieht es, daß auf die angegebene Weise nach kurzer Zeit noch ein zweiter Funken hervorgerufen wird, ohne daß dem einen Beleg noch Electricität von dem Conductor zugeführt worden wäre. 3) Hat man einen Apparat, dessen Belege isolirt abgenommen werden können, und man berührt die Belege mit einander, nachdem sie abgenommen sind, bringt dann wieder die Glasplatte zwischen beide, und verfährt, wie oben, so gewahrt man auch jetzt noch einen Funken.

Ein solcher Apparat heißt nach seinem Erfinder Franklin'sche Tafel, und seine Wirksamkeit beruht auf der in §. 64 besprochenen Electricitätserregung durch Vertheilung. Die Vertheilung in einem Leiter geschieht, nicht wenn der Leiter mit dem electrisirten Körper in Berührung ist (denn dann würde Mittheilung stattfinden), sondern wenn er von demselben noch durch einen dazwischen befindlichen Nichtleiter getrennt ist. Dieser Nichtleiter ist hier die Glasplatte. Das Beleg, welches mit dem

Digitized by Google

Conductor in Verbindung steht, ist der electrisirte Körper, und das andere Beleg ist der Leiter, in welchem die Vertheilung vor sich geht. Das letztere muß mit der Erde leitend verbunden sein, damit die abgestoßene Electricität entweichen, und nicht weiter auf die andere anziehend einwirken kann. Wird nun dem ersten Beleg immer neue Electricität, z. B. + E aus dem Conductor, zugeführt, so zieht sie auch auf der anderen Seite neue — E aus dem Erdboden heran, und beide binden sich gegenseitig, doch niemals kann die — E alle + E, welche aus dem Conductor zugeführt wird, vollständig binden, weil die gegenseitige Anziehung beider stets mehr oder weniger durch den Zwischenkörper, die Glasplatte, geschwächt wird. Auf dem ersten Beleg wird daher ein Theil der + E sich in freiem Zustande befinden. Bei fortgesetzter Zuführung aus dem Conductor wird sich diese freie + E stets vermehren, und dadurch eine größere Spannung erhalten. Daß diese jedoch nicht größer werden kann, als die Spannung der Electricität im Conductor ist, ist einleuchtend; wenn dieser Punkt eingetreten ist, kann deßhalb gar keine Electricität mehr von dem Conductor nach dem Beleg überströmen, und man sagt dann, die Franklin'sche Tafel sei *geladen*. Der in dem ersten Versuch beobachtete Funken erklärt sich nun ganz einfach nach §. 67. Zur Erklärung des zweiten Versuchs muß bemerkt werden, daß durch den ersten Funken sich nur gleiche Quantitäten der beiden Electricitäten vereinigt haben. Da nun das eine Beleg noch freie + E hat (das *Residuum*, der *Rückstand*), so kann diese nun auf dem anderen Beleg eine entsprechende Quantität — E von Neuem heranziehen, durch deren Vereinigung dann der zweite Funken entsteht.

Aus dem dritten Versuche endlich lernen wir, daß die beiden Electricitäten nicht nur auf den metallenen Belegen, sondern auch auf der Glasplatte vertheilt werden. Die Vertheilung auf der Glasplatte ist dabei eine dauernde, weil eben das Glas ein Nichtleiter der Electricität ist. Wenn also nach Abnahme beider Belege die entgegengesetzten Electricitäten derselben sich ausgeglichen haben, und nun die Glasplatte wieder zwischen die Belege gebracht wird, so nehmen diese jetzt als Leiter die Electricitäten der beiden Seiten der Glasplatte in sich auf.

Daß die Glasplatte nicht bis an den Rand belegt sein darf, ist ersichtlich, da sonst keine Vertheilung eintreten kann, sondern Mittheilung stattfindet. Aus der gegebenen Erklärung geht auch hervor, daß es nicht rathsam ist, eine dicke Glasplatte als Zwischenkörper anzuwenden; aber auf der anderen Seite darf man dieselbe auch nicht zu dünn nehmen, weil sich sonst bei einem hohen Grade der Spannung die beiden Electricitäten durch die Glasplatte hindurch vereinigen, indem sie ein Loch durch dieselbe brechen.

§. 72. **Fortsetzung; Leydner Flasche und electrische Batterie.** Es ist wohl klar, daß es an der Wirkungsweise Nichts ändern kann, wenn man statt der ebenen Platte der Franklin'schen Tafel eine gekrümmte Glasplatte, z. B. eine Flasche, wie man sich deren zu dem Einmachen des Obstes bedient, nimmt. Diese Modification führt uns dann zu der s. g. *electrischen Verstärkungsflasche*, einem Apparate, der also genau auf denselben Principien, wie die Franklin'sche Tafel beruht, aber bei dem Gebrauche handlicher ist. Die Verstärkungsflasche ist von beiden Apparaten auch der ältere; sie wurde nämlich fast gleichzeitig von dem Domherrn

Digitized by Google

von Kleist zu Kamin in Pommern (November 1745) und von Kunäus, einem Gehilfen des Professor Muschenbröck in Leyden (März 1746) erfunden, weßhalb sie auch die Kleist'sche Flasche oder noch gewöhnlicher die Leydner Flasche genannt wird. Um dem inneren Beleg bequem die Electricität des Conductors mittheilen zu können, ist sie oben gewöhnlich durch einen gefirnißten Holzdeckel geschlossen, durch welchen ein starker Messingdraht geht, der sich oben in einen Knopf endigt, unten aber durch ein Kettchen mit dem inneren Beleg in leitender Verbindung steht. Da unter sonst gleichen Umständen die Wirksamkeit des Apparats offenbar auch von seinen Dimensionen abhängt, solche großen Flaschen aber nicht leicht angefertigt werden, auch bei dem Gebrauche durchaus nicht bequem sein würden, so hat man sich, um größere Wirkungen zu erzielen, damit geholfen, daß man mehrere einzelne Leydner Flaschen so mit einander verbindet, daß sowohl alle inneren Belegungen, als auch alle äußeren, unter sich leitend verbunden sind. Dies geschieht in der Regel auf die Weise, daß durch alle Knöpfe der Drähte, welche nach dem Innern führen, starke Drähte gehen, und daß die äußeren Belege in einem Kasten stehen, dessen Innenseite mit einem metallischen Körper, gewöhnlich mit Stanniol, überzogen ist. Eine solche Combination einer Anzahl Leydner Flaschen nennt man eine electrische Batterie. Sie vertritt, wie schon bemerkt, eigentlich nur eine große Leydner Flasche, hat aber den Vorzug, daß man die wirksame Fläche nach Belieben vergrößern oder verkleinern kann, indem man nur eine größere oder kleinere Anzahl von Flaschen mit einander zu verbinden braucht, und daß durch Beschädigung einer einzelnen Flasche nicht gleich die ganze Batterie unbrauchbar wird, wie dies doch bei einer großen Flasche stets der Fall sein würde. Daß die oben erwähnten verschiedenen Wirkungsarten der Electricität bei Anwendung der Leydner Flasche oder der electrischen Batterie noch an augenfälligeren Beispielen deutlich gemacht werden können, leuchtet ein. Ehe wir jedoch einige derselben anführen, ist es nöthig, vorher noch 2 andere Apparate, deren man sich bei der Entladung der Leydner Flasche oder der electrischen Batterie zu bedienen pflegt, kennen zu lernen. Es sind dies der gewöhnliche Auslader, und der Henley'sche oder allgemeine Auslader. Der erstere besteht aus zwei starken, am einen Ende mit kleinen Metallkugeln versehenen, am anderen Ende um ein Charnier beweglichen Metalldrähten, und ist mit einem isolirenden Handgriff, gewöhnlich von Glas, versehen, damit, wenn man die Entladung durch denselben vornimmt, nicht auch der Körper des Experimentators mit in die leitende Verbindung der beiden Belege gebracht wird. Der Henley'sche Auslader besteht aus 2 auf einem Brette vertical stehenden Glassäulchen, welche oben messingene Fassungen haben, durch welche bewegliche starke messingene Drähte so hindurchgehen, daß ihre Enden, die gewöhnlich noch mit kleinen Kugeln versehen sind, einander mehr genähert oder von einander entfernt werden können. In der Mitte zwischen beiden Glassäulchen befindet sich auf demselben Fußbrette ein Tischchen mit einer Platte von einer isolirenden Substanz (Glas oder Elfenbein), welches höher oder niedriger gestellt werden kann. Dieser Auslader dient dazu, um die Wirkung der Vereinigung der beiden entgegengesetzten Electricitäten auf gewisse Körper besser beobachten zu können. Zu dem Ende bringt man den fraglichen Körper auf das Tischchen zwischen die Enden der beiden Drähte,

Digitized by Google

verbindet das eine äußere Drahtende durch ein Metallkettchen mit dem äußeren Beleg, und das andere vermittelst des gewöhnlichen Ausladers mit dem Knopfe des inneren Belegs.

Von den Versuchen, welche mit der Leydner Flasche oder der Batterie gewöhnlich angestellt werden, wollen wir nur einige wenige anführen. 1) Wenn man mehrere Kartenblätter, oder ein dünnes Brettchen, oder auch eine dünne Glasplatte auf das Tischchen des Ausladers bringt, und die Entladung durch sie hindurchgehen läßt, so werden sie durchbohrt. Bei einem Kartenblatt hat das Loch auf beiden Seiten aufgeworfene Ränder. 2) Wenn man 2 Drähte bis auf einen kleinen Abstand in eine Glasröhre steckt, die mit Wasser gefüllt und an beiden Enden mit Korkstöpseln verschlossen ist, und den electrischen Funken von einem Drahte auf den anderen überspringen läßt, so wird die Glasröhre zersprengt, indem das Wasser durch die Heftigkeit, mit welcher die Vereinigung der beiden Electricitäten stattfindet, sehr stark ausgedehnt wird. 3) Das Licht des Funkens ist bei einer Leydner Flasche oder einer Batterie gewöhnlich kurz und gradlinicht, und von einem Knalle begleitet. 4) Leitet man den Schlag über Kreide, Zucker oder andere leicht phosphorescirende Körper, so leuchten sie nachher im Dunkeln noch kurze Zeit. 5) Verbindet man die beiden inneren Enden des allgemeinen Ausladers durch einen feinen Eisendraht, so wird dieser bei der Entladung entweder glühend, oder sogar geschmolzen und in geschmolzenen Kügelchen umhergeworfen. Legt man ein Streifchen Goldblatt zwischen 2 Glasscheiben, und läßt dann die Entladung durch das Goldblatt gehen, so wird dieses in das Glas eingeschmolzen. 6) Schüttet man Schießpulver auf das Tischchen des Ausladers, und läßt die Entladung auf gewöhnliche Weise vor sich gehen, so wird das Pulver nur umhergeschleudert. Ersetzt man aber die Kette, welche nach dem äußeren Beleg führt, durch eine genäßte Schnur, so wird es flammend entzündet, woraus offenbar hervorgeht, daß die Wärmewirkung um so größer wird, je mehr die Entladung durch schlechtere Leiter verlangsamt wird. 7) Entladet man eine Leydner Flasche durch den menschlichen Körper, indem man das äußere Beleg mit der einen Hand faßt, und mit einem Knöchel der anderen Hand dem Knopf des inneren Belegs nahe kommt, so empfindet man eine starke Erschütterung, ja diese Erschütterung kann einer ganzen Reihe von Personen, welche sich an den Händen anfassen, und dadurch eine ununterbrochene leitende Verbindung bilden, zu gleicher Zeit mitgetheilt werden. 8) Durch einen starken Entladungsschlag können kleine Thiere getödtet werden. 9) Wenn man in den Schließungsbogen einer starken Batterie einen über eine gläserne Röhre spiralförmig gewundenen Metalldraht bringt, und in die Röhre eine stählerne Nähnadel legt, so ist diese, nachdem der Entladungsschlag durch die Spirale hindurch gegangen ist, magnetisch.

Hier muß noch Lane's Flasche erwähnt werden. Diese unterscheidet sich von einer gewöhnlichen Leydner Flasche dadurch, daß dem Knopfe derselben ein anderer gegenübersteht, der am Ende eines verschiebbaren Drahtes befestigt ist. Zu dem Ende geht dieser Draht durch eine Hülse, welche mit dem äußeren Beleg leitend verbunden ist. Man wendet sie an, um die Stärke der Ladung einer Flasche zu messen. Denn je näher man dem einen Knopf den andern bringen muß, damit die Flasche sich selbst entladet, desto geringer ist offenbar die Spannung, und also auch die Dichte der in ihr auf-

Digitized by Google

gehäuften Electricität. Man kann auch mittelst derselben die Electricitätsmengen, welche 2 verschiedene Electrisirmaschinen in gleichen Zeiten geben, vergleichen. Denn erfolgen bei Anwendung der einen Maschine in einer gegebenen Zeit n Entladungen der Lane'schen Flasche, und bei Anwendung der anderen Maschine m Entladungen, so müssen sich die von den Maschinen in gleichen Zeiten abgegebenen Electricitätsmengen wie n : m verhalten, da bei gleichem Abstande der beiden Knöpfe eine Entladung immer nur dann erfolgen kann, wenn die auf den Belegen angehäuften Electricitäten eine gleiche Spannung erlangt haben.

§. 73. **Fortsetzung; Electrophor.** Der Electrophor (φορός, tragend, der Electricitätsträger) besteht aus einer seichten Schüssel, die Form genannt, von einem die Electricität leitenden Stoffe (Eisenblech oder Holz mit Stanniol überzogen). Diese ist gewöhnlich mit einer harzigen Substanz (empfohlen wird sehr eine Masse bestehend aus 10 Theilen Gummilack, 3 Theilen Harz, 2 Theilen venetianischen Terpentin, 2 Theilen Wachs und ½ Theil Pech; auch wohl ganz einfach Schellack mit etwas venetianischem Terpentin versetzt) ausgegossen, die der Kuchen genannt wird, und eine möglichst ebene Oberfläche haben muß. Ein zweiter Haupttheil ist eine leitende, ebenfalls möglichst ebene Platte (Messingblech oder mit Stanniol überzogene Pappe), welche kleiner ist, als der Kuchen, und mittelst einer in ihrer Mitte angebrachten gläsernen Handhabe oder mittelst seidener Schnüre isolirt auf den Kuchen gelegt, oder von ihm abgehoben werden kann. Dieser Theil heißt der Deckel oder die Trommel des Electrophors. Mit dem Electrophor lassen sich folgende Erscheinungen hervorrufen, nachdem der Kuchen mit einem Fuchsschwanz oder Katzenfell negativ electrisirt worden ist: 1) Wenn dem Deckel, welcher auf den Kuchen gesetzt worden ist, der Finger genähert wird, so gewahrt man einen schwachen schneidenden Funken. 2) Wenn dann der Deckel nochmals berührt wird, so zeigt er entweder gar keine electrischen Erscheinungen mehr, oder es entsteht höchstens ein viel unbedeutenderer Funken, als der erste war. 3) Wenn aber der Deckel, nachdem er berührt worden ist, isolirt in die Höhe gehoben wird, so gibt er an jeden genäherten Leiter einen Funken ab. 4) Wird er dagegen in die Höhe gehoben, ohne vorher berührt worden zu sein, so wird kein Funken beobachtet. 5) Wenn man den Deckel auf den Kuchen auflegt, und nun, ohne ihn berührt zu haben, mit einem Finger den äußeren Rand der Form, mit einem anderen die obere Fläche des Deckels berührt, so geht durch die Finger ein electrischer Schlag. 6) Alle diese Erscheinungen lassen sich eine längere Zeit hindurch immer von Neuem wiederholen, ohne daß der Kuchen wieder frisch mit dem Pelzwerke gerieben worden ist. So können durch Wiederholung des dritten Versuchs mehrere Leydner Flaschen durch den einmal geriebenen Electrophor geladen werden, indem man die Funken des Deckels an den Knopf der Flasche überschlagen läßt.

Nimmt man bei Anstellung des ersten Versuchs ein Probescheibchen statt des Fingers, um an einem Electroscope untersuchen zu können, welche der beiden Electricitäten auf der oberen Fläche des Deckels angehäuft sei, so wird man finden, daß es die negative Electricität ist; untersucht man aber im dritten Versuch die Electricität des Deckels an einem Electroscope, so ist es jetzt die positive. Daraus folgt also für uns mit Gewißheit so

Digitized by Google

viel, daß der Deckel, da er beide electrische Zustände zeigt, nicht durch Mittheilung von dem Kuchen electrisch geworden ist, indem er ja in diesem Falle nur negative Electricität zeigen könnte. Der Deckel muß demnach durch Vertheilung electrisch geworden sein, was auch noch daraus hervorgeht, daß die dem Kuchen zugewandte Seite die entgegengesetzte, die abgewandte aber die nämliche Electricität, wie der Kuchen zeigt. Die Wirksamkeit des Instruments lehrt also auch, daß, wenn einem Harzkuchen durch Reibung Electricität mitgetheilt wird, diese an der Harzfläche begierig haftet, und nur schwer auf eine ebene Fläche ohne Hervorragungen (s. oben über den Einfluß der Spitzen, §. 69) durch Mittheilung übergeht. Der zweite Versuch erklärt sich daraus, daß durch den ersten Funken die negative Electricität der oberen Seite sich ausgeglichen hat mit positiver des genäherten Fingers, die positive der unteren Seite aber durch die negative des Kuchens gebunden gehalten wird. Wenn aber bisweilen noch ein unbedeutendes Fünkchen beobachtet wird, so erklärt sich das durch die Annahme, daß durch den ersten Funken nicht alle negative Electricität zur Ausgleichung gelangt ist. Der vierte Versuch erklärt sich einfach dadurch, daß durch die Entfernung des Deckels von dem vertheilenden Kuchen die beiden durch die Vertheilung getrennt gewesenen Electricitäten sich sofort wieder vereinigen, wodurch dann der Deckel in den unelectrischen Zustand zurückgeführt wird. Da im fünften Versuch ein electrischer Schlag beobachtet wird, dieser aber die Folge ist von der Ausgleichung der 2 entgegengesetzten, in gespanntem Zustande sich befindenden Electricitäten, so müssen wir annehmen, daß auch in der Form Electricität angehäuft sei, und zwar muß dieses positive sein, weil diejenige der oberen Fläche des Deckels negativ war. Auch diese Electricität kann nur durch eine Vertheilung durch den Kuchen hervorgerufen sein, wodurch sich auch ihre positive Natur hinlänglich erklärt; die abgestoßene negative der Form ist nach dem Erdboden zurückgedrängt. Daß nach dem sechsten Versuche der Kuchen seinen electrischen Zustand längere Zeit beibehält, beruht eben in seiner isolirenden Natur, da isolirende Körper sich auch dadurch von den Leitern unterscheiden, daß sie, wenn in ihnen eine Vertheilung stattgefunden hat, das Bestreben zeigen, in dem Zustande der Vertheilung zu beharren. Wenn nach der Erfahrung der electrische Zustand des Kuchens besonders lang dadurch erhalten wird, daß der Deckel auf ihm liegt, so erklärt sich das ganz einfach durch das gegenseitige Binden der beiden Electricitäten. Die letztere Erscheinung ist es auch, welche dem Instrumente seinen Namen Electricitätsträger gegeben hat. Der Electrophor ist im Jahre 1762 von Wilke erfunden, und im Jahre 1775 von Volta in verbesserter Gestalt bekannt gemacht worden. Daß die Harzmasse durch jede andere isolirende Substanz, z. B. Glas, vertreten werden kann, braucht wohl nicht erst erwähnt zu werden. Wegen der ungleichen Ausdehnung der Form und des Kuchens durch die Wärme bekommen die oben beschriebenen Instrumente leicht Risse, und muß aus dieser Ursache der Kuchen oft umgeschmolzen werden. Dieser Uebelstand ist beseitigt, wenn man statt des Harzkuchens eine Tafel Gutta Percha nimmt, welches zu den besten Isolatoren gehört, weßhalb auch die in neuester Zeit in Gebrauch kommenden Gutta Percha Electrophore sich ganz vorzüglich wirksam erweisen. Eine praktische Anwendung hatte der Electrophor in den electrischen Zündmaschinen gefunden, in welchen das entwickelte ausströmende

Wasserstoffgas durch den Funken des in die Höhe gehobenen Electrophordeckels entzündet wird, dieselben sind aber gegenwärtig durch Erfindung der viel einfacheren Döbereiner'schen Platina-Zündmaschinen fast ganz wieder verdrängt worden.

§. 74. **Fortsetzung; Condensator.** Der Condensator (condensare verdichten) besteht aus 2 eben geschliffenen runden Metallplatten, deren Durchmesser 2 bis 3 Zoll beträgt, und von welchen die untere auf einem isolirenden Fuße ruht, während die obere mit einem isolirenden Handgriff versehen ist. Die 2 einander zugewandten Seiten der Metallplatten sind mit einer sehr dünnen Firnißschicht überzogen. Die untere Platte heißt die Condensatorplatte oder Basis, die obere die Collectorplatte (Sammelplatte). Die Erfahrung lehrt nun, daß manche Körper, wenn man sie unmittelbar mit dem Knopfe eines Electroscops in Berührung bringt, auf dasselbe nicht einwirken, daß aber dieselben Körper dies dennoch durch Vermittlung des Condensators thun, wenn man auf folgende Weise verfährt: während die Collectorplatte auf der Condensatorplatte liegt, und letztere mit dem Boden in leitende Verbindung gebracht ist, berühre man mit dem zu untersuchenden Körper die Collectorplatte einige Secunden lang oder zu wiederholten Malen; nachdem hierauf die Verbindung der Basis mit dem Boden aufgehoben ist, hebe man die Collectorplatte möglichst parallel der Basis an ihrem isolirenden Handgriffe ab, und berühre mit ihr den Knopf des Electroscops, so zeigt dieses jetzt Electricität an.

Wer die Erklärung der Franklin'schen Tafel und der Leydner Flasche verstanden hat, dem wird auch die Wirkungsweise des Condensators, der genau auf denselben Principien beruht, verständlich sein. Es ist im Grunde genommen ganz derselbe Apparat, wie die Franklin'sche Tafel, nur in kleineren Dimensionen. Was dort die Glastafel war, ist hier die Firnißschicht. Auch sind die erwähnten Apparate ebenfalls Condensatoren oder Verdichter der Electricität, denn die größeren Wirkungen derselben im Vergleich zu denen des Conductors waren ja auch nur die Folge davon, daß die Electricität des Conductors durch dieselben in größere Spannung versetzt wurde, und zwar dadurch, daß die dem einen Beleg mitgetheilte Electricität durch die in dem anderen Belege hervorgerufene entgegengesetzte gebunden und so verhindert wurde, gegen die später noch durch Mittheilung zugeführte abstoßend zu wirken, was sie im freien Zustande hätte thun müssen. Schon aus den verminderten Dimensionen des Condensators ist ersichtlich, daß er nur bei der Untersuchung solcher Körper eine Anwendung finden wird, deren electrische Spannung sehr unbedeutend ist, so unbedeutend, daß sie nicht einmal die Goldblättchen des Electroscops in Bewegung zu setzen vermag. Die Wirksamkeit des Condensators wird dadurch sehr gesteigert, daß die isolirende Schicht, der Firniß, so sehr dünn ist, aber dies ist wieder nur dann möglich, wenn man es nur mit Electricität von sehr geringer Spannung zu thun hat, weil anderen Falls die isolirende Schicht von der Electricität durchbrochen würde. Der Condensator ist im Jahre 1783 von Volta erfunden worden, und führt wohl bisweilen auch den Namen Mikroëlectrometer (Messer unbedeutender Electricität). Da der Condensator immer gleichzeitig mit einem Electroscope in Anwendung kommt, so ist man darauf bedacht gewesen, beide in einem einzigen Instrumente mit einander zu verbinden. Zu dem Ende läßt man den Draht des Elec-

Digitized by Google

troscops statt in einen Knopf in eine Metallplatte endigen, welche auf ihrer oberen Fläche gefirnißt ist, und auf welche dann eine gleich große, auf ihrer unteren Fläche gefirnißte und auf der oberen mit einem gläsernen Griffe versehene aufgesetzt wird. Beim Gebrauche vertritt hier in der Regel die untere Platte die Stelle der Collectorplatte, und die obere die der Basis, weßhalb man auch zur größeren Bequemlichkeit der Handhabung an der unteren Platte gewöhnlich noch einen starken Metalldraht anlöthet, der sich in ein Kügelchen endigt, mit welchem der zu untersuchende Körper in Berührung gebracht wird. Ebenso gut könnte aber auch die obere Platte als Collectorplatte benutzt werden, nur darf man alsdann nicht vergessen, daß die zu den Goldblättchen gelangende Electricität die entgegengesetzte von derjenigen des zu untersuchenden Körpers ist.

§. 75. **Verbreitungsweise der Electricität; sie verbreitet sich nur auf der Oberfläche der Körper.** 1) Man nehme eine Metallkugel auf einem Glasfuß, theile ihr Electricität mit, umschließe sie dann mit 2 hohlen Halbkugeln von Metall, die mit isolirenden Handhaben versehen sind. Nachdem man die Halbkugeln wieder abgenommen hat, wird man finden, daß die Metallkugel all ihre Electricität verloren hat, während die beiden Halbkugeln electrisch befunden werden. 2) Um einen dünnen Cylinder von Messing, der sich in 2 Knöpfen endigt, ist ein Stück Goldpapier gewunden. Das andere freie Ende des Papiers ist um ein Glasstäbchen geklebt, in dessen Mitte an leinenen Fäden ein Paar Hollundermarkkügelchen aufgehängt ist. Der messingene Cylinder hängt an 2 seidenen Schnüren, und die Enden des Glasstäbchens sind durch einen längeren Seidenfaden mit einander verbunden. Wenn man an dem seidenen Faden zieht, wird das Goldpapier abgerollt, läßt man dagegen mit dem Zuge nach, so rollt es sich wieder auf. Wird nun dem Goldpapier Electricität mitgetheilt, so gelangt diese auch durch die leinenen Fäden zu den Hollundermarkkügelchen, die dadurch gleichnamig electrisch werden, und also divergiren. Wird nun das Goldpapier mehr abgerollt, so wird die Divergenz der Kügelchen kleiner; wird es dagegen aufgerollt, so wird sie größer.

Daß in dem ersten Versuch die Kugel an die Halbkugeln Electricität abgibt, hat Nichts Auffallendes, weil dies ja jedes Mal geschieht, so oft ein Leiter mit einem electrischen Körper in Berührung kommt. Wohl aber hätte man erwarten sollen, da beide bei der Umschließung gewissermaßen einen einzigen isolirten Leiter ausmachen, daß die Electricität sich gleichmäßig über die Kugel und die Halbkugeln verbreitete. Es ist aber nicht der Fall, und es bleibt uns zur Erklärung der Erscheinung Nichts übrig, als anzunehmen, daß die Electricität sich nur über die Oberflächen der Körper verbreite. Dadurch erklärt sich nun auch die Erfahrung, daß in einem massiven Conductor unter sonst gleichen Umständen die Electricität nicht zu höherer Spannung gebracht werden kann, als in einem hohlen von derselben Gestalt und von gleichen Dimensionen, worin auch der Grund zu suchen ist, daß man gegenwärtig nur hohle Körper zu Conductoren anwendet. Nun wird uns aber auch der zweite Versuch klar, der Anfangs deßwegen auffällt, weil wir hier dieselbe Menge Electricität bald größere, bald kleinere Wirkungen hervorbringen sehen. Die Größe der mechanischen Wirkung einer gewissen Quantität von Electricität hängt, wie schon bemerkt, von dem Grade der Spannung ab, in welcher sie sich be-

Digitized by Google

findet. Da nun bei dem Abrollen die Divergenz geringer wird, so muß die Spannung abgenommen, die Electricität sich also über einen größeren Raum verbreitet haben. Das Goldpapier hat aber durch das Abrollen wirklich eine größere Oberfläche erhalten. Beim Aufrollen wird die Divergenz größer, die Electricität muß also auf einen kleineren Raum zusammengedrängt sein, sie muß also die aufgewickelten Theile des Goldpapiers verlassen und sich zu derjenigen des noch nicht aufgewickelten Theils begeben haben. Der zweite Versuch gibt uns zu gleicher Zeit auch die experimentelle Bestätigung des in §. 67 aufgestellten Satzes, daß sich die Spannungen der Electricität umgekehrt verhalten, wie die Räume, über welche sie verbreitet ist.

§. 76. Fortsetzung; Geschwindigkeit. 1) Watson stellte in London im Jahre 1748 folgenden Versuch an: von einem Zimmer, in welchem sich eine Electrisirmaschine und eine Leydner Flasche befand, führte er 2 Drähte, deren jeder ½ geogr. Meile lang war, in mehrfachen Windungen auf isolirenden Holzstäben über ein flaches Feld, und wieder zurück in das Zimmer, so daß in dem Zimmer alle 4 Enden der beiden Drähte waren. Er hielt in jeder Hand das eine Ende eines Drahtes; von den beiden anderen Enden wurde das eine mit dem äußeren Beleg der geladenen Flasche verbunden, und mit dem anderen dann die Flasche entladen. In dem Momente der Entladung wurde auch von ihm die Erschütterung in der Brust und in den Armen empfunden. 2) Wheatstone hat im Jahre 1835 die Electricität einer geladenen Leydner Flasche durch einen ½ engl. Meile langen Kupferdraht geleitet, der in der Nähe der beiden Belege sowohl, als auch in der Mitte unterbrochen war. An diesen 3 Stellen mußten also bei der Entladung Funken auftreten. Diese Funken beobachtete er aber nicht direct, sondern ihre Spiegelbilder in einem sich rasch um eine Axe drehenden Metallspiegel. Die Vorrichtung war so getroffen, daß bei ruhendem Spiegel alle 3 Spiegelbilder der Funken in grader Linie lagen. Bei sehr rascher Drehung des Spiegels (800 Umdrehungen in einer Secunde) war aber stets das Bild des mittleren aus der graden Linie herausgerückt, und zwar nach der einen oder der anderen Seite, je nachdem der Spiegel in der einen Richtung oder in der entgegengesetzten gedreht wurde.

Aus dem Versuche Watson's ging soviel hervor, daß die Zeit, in welcher die Electricität den Weg von ½ geogr. Meile durchläuft, so unendlich klein muß, daß sie von uns nicht bestimmt werden kann. Es entstand nun die Frage, ob der durchlaufene Weg zu klein war, um einen Zeitunterschied bemerken zu können, oder ob die Verbreitung vielleicht gar auf alle Entfernungen momentan erfolge. Diese Frage suchte Wheatstone durch seinen Versuch zu beantworten. Wenn die 3 Funken gleichzeitig entstanden, also die Verbreitung der Electricität momentan erfolgte, so mußten die Spiegelbilder offenbar stets, in welcher Richtung sich auch der drehende Spiegel befinden mochte, ebenso gut in grader Linie liegen, wie wenn der Spiegel ruhte. Dem widersprach der Versuch, also sind die Funken nicht gleichzeitig. Das mittelste Bild war nach der einen oder der anderen Seite aus der graden Linie herausgerückt. Dies erklärt sich vollständig dadurch, daß der Spiegel erst noch gedreht werden mußte, bis der Funken und damit sein Bild entstand, denn dann mußte das Bild des mittleren Funkens gegen diejenigen der beiden äußeren sich nach der Richtung der Drehung des Spiegels verschoben zeigen. Der Versuch lehrte uns also, daß die Elec-

Digitized by Google

tricität zu ihrer Verbreitung eine, wenn auch äußerst kleine, Zeit nöthig habe, er lehrte uns aber auch zu gleicher Zeit noch eine andere wichtige Thatsache. Es war nämlich nur das Bild des mittleren Funkens verschoben, folglich sind die beiden äußersten Funken gleichzeitig entstanden, und der mittelste später. Daraus ersehen wir, daß bei der Entladung der Leydner Flasche, wie überhaupt bei der Ausgleichung der beiden entgegengesetzten Electricitäten in dem electrischen Funken, nicht ein Strömen der einen nach der anderen angenommen werden darf, sondern daß beide sich gleichzeitig auf dem dargebotenen Wege gegen einander hinbewegen.

Nun blieb nur noch übrig, die Größe der Geschwindigkeit numerisch zu bestimmen. Zu diesem Zwecke mußte die Größe der Verschiebung gemessen werden, sie betrug $\frac{1}{4}°$. Es läßt sich zeigen, daß, wenn man einen Spiegel um eine in seiner Ebene liegende Are um irgend einen Winkel dreht, die Bilder aller im Spiegel sich zeigenden Gegenstände Kreisbögen beschreiben, welche doppelt so groß sind, als derjenige, um welchen der Spiegel gedreht wurde.

Fig. 12.

AB (Fig. 12) sei die Projection des Spiegels auf die Papierebene, C die Projection der Are, um welche er gedreht werden kann, a ein leuchtender Punkt, so ist, wenn Bogen $am = ma'$ ist, a' der Ort seines Bildes, da bei ebenen Spiegeln Object und Bild gleiche Entfernung vom Spiegel haben. Wird nun der Spiegel um den Bogen mn gedreht, so daß er in die Lage A'B' kommt, während der leuchtende Punkt a seinen Ort beibehält, so muß jetzt das Bild in a'' entstehen, wenn $an = na''$ ist. Das Bild hat also den Bogen $a'a''$ beschrieben. Es ist aber $an = na''$ oder $am + mn = na' + a'a''$, also $am + mn = na' = a'a''$, oder, da $am = ma'$ war, $ma' - na' + mn = a'a''$, und, weil $ma' - na' = mn$ ist, $mn + mn = a'a'' = 2mn$. Wheatstone hatte demnach folgende Proportion: die Zeit, welche zwischen dem Erscheinen der 2 Funken verfließt, verhält sich zur Zeit einer ganzen Umdrehung des Spiegels, wie die Hälfte der Verschiebung des Bildes zu 360°, oder $x : \frac{1}{360} = \frac{1}{4} : 360$, woraus $x = \frac{1}{4 \times 800 \times 360} = \frac{1}{1152000}$ Secunde. In dieser Zeit durchlief also die Electricität $\frac{1}{4}$ engl. Meile, folglich in einer Secunde $1152000 \times \frac{1}{4}$ oder 288000 engl. oder 62462 geogr. Meilen. Diese ungeheure Geschwindigkeit, welche selbst $1\frac{1}{2}$mal so groß wie diejenige des Lichts ist, dürfte indeß die Electricität nicht in allen Körpern haben, sondern sie dürfte sich um so mehr vermindern, ein je schlechterer Leiter der Körper ist, durch welchen sie sich bewegt.

§. 77. **Dauer des Lichts eines electrischen Funkens.** Wenn man in einem dunkeln Zimmer eine gespannte Saite schwingen läßt, oder ein gezahntes Rad schnell umdreht, oder den Farbenkreisel (§. 203) rotiren läßt, und man entlädt eine Leydner Flasche, so scheinen diese, bei der Beleuchtung des electrischen Funkens gesehen, still zu stehen. Die Saite erscheint

Digitized by Google

gekrümmt, an dem Rade kann man die einzelnen Zähne, und an dem Farbenkreisel die verschiedenen Farben unterscheiden.

Das scheinbare Stillstehen beweist, daß das Licht nur eine so kurze Zeit wirksam gewesen ist, daß der Weg, welchen die bewegten Körper in derselben zurücklegen, zu klein ist, um von uns wahrgenommen zu werden. Trotzdem aber, daß diese Dauer so sehr klein ist, ist es doch durch den Wheatstone'schen Versuch möglich gewesen, ihren Werth numerisch zu bestimmen. Die Bilder der Funken zeigten sich nämlich in dem gedrehten Spiegel nicht als Punkte, sondern als Linien, und zwar bei der Drehung des Spiegels um eine feste Are natürlich als Kreisbögen. Die Größe dieser Kreisbögen muß von der Dauer des Lichts abhängen, und mit derselben ab- oder zunehmen, so daß sich aus der Größe der Bögen auf die Größe der Dauer zurückschließen läßt. Da nun der Spiegel in einer Secunde 800 Umdrehungen machte, so durchlief er also in einer Secunde 360×800 Grade. Würde nun der Funken eine Secunde lang geleuchtet haben, so würde sein Bild, da es nach dem vorgehenden Paragraph einen doppelt so großen Bogen, als der Spiegel beschreibt, $2 \times 360 \times 800$ Grade durchlaufen haben. Der gemessene Bogen betrug aber noch nicht ganz $\frac{1}{2}$ Grad, folglich muß die Dauer so vielmal kleiner, als eine Secunde gewesen sein, so vielmal $\frac{1}{2}$ Grad kleiner als $2 \times 360 \times 800$ Grade ist, d. h. sie muß kleiner, als $\frac{1}{115\frac{1}{1000}}$ Secunde gewesen sein.

§. 78. **Nebenstrom.** Rieß in Berlin hat folgende Versuche angestellt: 1) In den Schließungsbogen einer starken Batterie schaltete er einen spiralförmig auf eine Glasröhre aufgewundenen Kupferdraht AA' (Fig. 13) ein. Ueber die Glasröhre war eine weitere Glasröhre geschoben, und über diese ein anderer Kupferdraht BB' gewunden, dessen Enden a und b frei herabhingen. An diese Enden waren die Enden einer dritten, ebenfalls auf eine Glasröhre aufgewundenen Spirale CC' befestigt. Wenn er die Verbindung bei a löste, und die Drahtenden in einige Entfernung brachte, so sah er bei a einen Funken überspringen, so oft die stark geladene Batterie entladen wurde. 2) Legte er in die Glasröhre, auf welche die Spirale CC' gewickelt war, eine englische Nähnadel, so war diese nach der Entladung der Batterie magnetisch geworden.

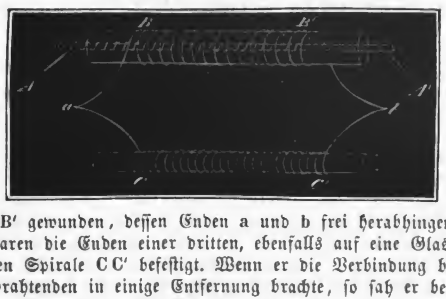


Fig. 13.

Aus diesen Versuchen ergibt sich, daß, wenn eine electrische Batterie durch einen längeren Metalldraht entladen wird, der in dem Schließungsbogen circulirende electrische Strom in einer nahe stehenden, geschlossenen Drahtleitung ebenfalls einen Strom hervorrufen kann. Man nennt den Strom im Schließungsbogen den Hauptstrom, und denjenigen in der benachbarten Drahtleitung den Nebenstrom, den Draht, welcher den Schließungsbogen bildet, den Hauptdraht, den Draht, in welchem der Strom inducirt wird, den Nebendraht. Durch den Nebenstrom werden

Digitized by Google

auch Wärmewirkungen und die electrische Erschütterung hervorgebracht, er zeigt überhaupt alle Wirkungen des Hauptstroms, wenn auch im schwächeren Maße. Seine Stärke wächst mit derjenigen des Hauptstroms und mit der Länge des Weges, welchen beide parallel neben einander durchlaufen. Die obige Anordnung des Haupt- und Nebendrahtes war die ursprüngliche, gegenwärtig hat man ihnen eine für die Anstellung der Versuche bequemere Form gegeben.

Zweites Kapitel.

Von der galvanischen Electricität.

§. 79. **Electricitätserregung durch Berührung verschiedenartiger fester Körper.** 1) Man nehme eine mehrere Zolle im Durchmesser haltende, recht glatte Zink- und eine eben solche Kupferplatte, befestige jede derselben an einem isolirenden Handgriff, fasse beide Platten an denselben, bringe sie mit einander in Berührung, trenne sie hierauf, und berühre mit der einen die Collectorplatte eines Condensators. Dieses Verfahren wiederhole man öfter, nachdem man vor jeder neuen Berührung der beiden Platten diejenige erst mit dem Finger ableitend berührt hat, welche nicht an die Collectorplatte gebracht wird. Wird dann durch ein Electroscop untersucht, so findet man, daß stets dem Condensator von der Platte Electricität mitgetheilt worden sei, und zwar positive, wenn man ihn mit der Zinkplatte, negative, wenn man ihn mit der Kupferplatte berührt hatte. 2) An einem Electroscope, das schon mit einem Condensator verbunden ist, berühre man die obere Platte mit dem Finger, die untere Platte aber mit einem Stücke Zink, das man in der anderen Hand hält. Nachdem die Berührung kurze Zeit gedauert hat, nehme man den Finger von der oberen und das Zink von der unteren Platte weg, hebe die obere Platte ab, so zeigt das Electroscop Electricität an, und zwar negative. Sind, wie gewöhnlich, die Condensatorplatten aus Messing, und wiederholt man den Versuch, nur mit dem Unterschiede, daß man statt des Stückes Zink ein Stück Messing nimmt, so erhält man keine Wirkung. Dagegen macht es keinen Unterschied, wenn man statt des Stückes Zink ein Stück eines anderen Metalls nimmt; nur zeigt alsdann das Electroscop nicht immer dieselbe Electricität, und auch nicht immer von derselben Intensität. 3) Man nehme eine Doppelplatte, deren eine Hälfte von Zink, die andere von Kupfer ist, und die in der Mitte zusammengelöthet sind. Nimmt man das Zink in die Hand, und berührt mit dem Kupfer den Condensator, so zeigt das Electroscop negative Electricität, nachdem die obere Condensatorplatte abgehoben ist.

Es fragt sich hier zunächst, woher die von dem Electroscope angezeigte Electricität komme, und es zeigt sich uns keine andere Antwort, als die Annahme, daß sie durch die Berührung der zwei Metalle hervorgerufen worden sei. Wir schließen, daß bei der Berührung zweier Metalle, z. B. Zink und Kupfer, eine Störung des electrischen Gleichgewichts, eine Vertheilung der entgegengesetzten Electricitäten in der Art stattfindet, daß von dem einen nach dem anderen positive, von dem letzteren aber nach dem ersteren negative Electricität übergeht. Die hier wirkende Ursache ist uns zwar nicht näher bekannt, wir haben ihr aber den Namen **electromo-**

Digitized by Google

torische Kraft (movêre erregen) gegeben, während man die sich berührenden Körper Electromotoren (Electricitätserreger) nennt. Dem Wesen nach ist der zweite Versuch ganz derselbe, wie der erste, und der Unterschied besteht hier nur darin, daß die Collectorplatte des Condensators zu gleicher Zeit noch die Stelle der Kupferplatte des ersten Versuchs mitvertreten muß. Daraus aber, daß ein Stück Messing keine Wirkung hervorbringt, lernen wir, daß sich nothwendig zwei verschiedenartige feste Körper berühren müssen, wenn Electricität erregt werden soll. Auch sind die Versuche bisher nur mit solchen festen Körpern gelungen, welche als gute Leiter der Electricität bekannt sind. Der Einwand, daß durch die Berührung der Metallplatten eine, wenn auch nur schwache, Reibung stattfinde, und daß wir es demnach nicht mit einer neuen Quelle der Electricitätserregung zu thun hätten, sondern mit der schon bekannten Reibungselectricität, ist durch den dritten Versuch beseitigt.

Diese Versuche, welche sich alle bei näherer Betrachtung nur als Modificationen von einander erweisen, heißen gewöhnlich der Volta'sche Fundamentalversuch, weil er von Alexander Volta, Professor der Physik zu Padua, welchen wir schon als Verbesserer und Veröffentlicher des Electrophors und als Erfinder des Condensators kennen, zuerst angestellt wurde, und weil durch denselben die irrige Ansicht des eigentlichen Entdeckers dieser neuen Electricitätsquelle schlagend widerlegt wird. Dieser Entdecker war Ludwig Galvani, Professor der Anatomie zu Bologna, der uns in einer Schrift selbst erzählt, wie er durch einen günstigen Zufall im Jahre 1790 zu seiner interessanten, wichtigen Entdeckung gelangt ist. Als er eines Abends in Gesellschaft einiger Freunde sich auf seinem Zimmer mit Versuchen beschäftigte, lagen zufällig mehrere enthäutete Frösche auf einem Tisch, auf welchem sich auch eine Electrisirmaschine befand. Ohne etwas zu beabsichtigen, brachte ein Gehilfe die Spitze eines Secirmessers an den Cruralnerven eines solchen Frosches, und sah mit Erstaunen, daß in demselben Augenblick die Schenkelmuskel sich convulsivisch zusammenzogen. Ein Anderer glaubte zu bemerken, daß diese Zuckungen nur dann erfolgten, wenn in demselben Augenblicke aus dem von dem Frosche ziemlich entfernten Conductor der Electrisirmaschine ein Funken ausgezogen wurde. Galvani fand diese Abhängigkeit der Zuckungen und des Funkens vollkommen bestätigt. Er verfolgte daher diese Versuche weiter, und prüfte unter anderen auch den Einfluß der Luftelectricität (§. 119 ꝛc.) auf die Erzeugung der Zuckungen in den Froschpräparaten. In dieser Absicht hatte er mehrere zubereitete Froschschenkel an dem eisernen Gitter eines Gärtchens aufgehangen; es erfolgte aber, so lange er auch wartete, kaum die leiseste Zuckung. Des langen Harrens müde bog er die Metalldrähte, welche durch das Rückenmark des Thieres gestochen waren, gegen das Gitter zurück, um vielleicht auf diese Art durch Zuführung der atmosphärischen Electricität durch das Gitter seinen Zweck zu erreichen; und in der That erhielt er jetzt starke Zusammenziehungen der Muskeln, die jedoch, nach allen übrigen Umständen zu schließen, mit den Veränderungen der atmosphärischen Electricität in keinem Verhältniß zu stehen schienen. Um sich hiervon völlig zu überzeugen, wiederholte er in einem wohl verschlossenen Zimmer zu verschiedenen Stunden des Tages dieselben Versuche, indem er das Froschpräparat auf eine eiserne Scheibe legte, und den in das Rücken-

Digitized by Google

mark gesenkten Haken damit in Berührung brachte, wo sich dann bei jedesmaliger Berührung lebhafte Zusammenziehungen zeigten. Dadurch wurde er zu der Annahme einer eigenthümlichen thierischen Electricität geführt, indem er die Muskeln mit einer geladenen Leydner Flasche verglich, die durch die Metalle, welche den Schließungsbogen bildeten, entladen werde, und dadurch die Zuckungen hervorrufe.

Diese von Galvani aufgestellte Ansicht mußte für irrig befunden werden, sobald Volta's Versuch bekannt wurde. Doch wird ihm zu Ehren die durch die Berührung zweier verschiedener Körper hervorgerufene Electricität noch immer Galvanische Electricität (wohl auch Contact- oder Berührungselectricität) genannt.

§. 80. **Spannungsreihe.** Schon Volta hat dadurch, daß er die Versuche nicht nur mit Kupfer und Zink, sondern auch mit anderen Metallen anstellte, und durch das Electroscop die Größe der durch die Berührung hervorgebrachten electrischen Spannungen beurtheilte, eine Reihe aufgestellt, in welcher die Metalle so geordnet sind, daß, wenn man irgend zwei derselben mit einander in Berührung bringt, das in der Reihe voranstehende positiv, das nachfolgende negativ electrisch wird, und daß die erzeugte electrische Spannung desto größer ist, je weiter die beiden Körper in der Reihe von einander abstehen. Diese Reihe führt deßhalb auch den Namen electrische Spannungsreihe. Beschränken wir uns auf die am meisten in Anwendung kommenden Körper, so erhalten wir folgende Reihe: Zink, Blei, Zinn, Eisen, Kupfer, Silber, Gold, Platina, Kohle. Doch muß bemerkt werden, daß die kleinste Aenderung der chemischen Natur oder selbst nur der Oberfläche eines Körpers seine Stelle in der Spannungsreihe verändern kann. So geben zwei ganz gleiche Zinkplatten, wenn sie sich gegenseitig berühren, keine Electricität; wird aber nach Baumgartner eine davon mit einer Silberplatte auch nur einmal gerieben, oder läßt man sie einige Zeit mit einer solchen in Berührung, so gibt sie mit der anderen in Verbindung negative Electricität. Ferner lehrt die Erfahrung, daß die electrische Spannung derselben zwei in Berührung befindlichen Körper nicht von ihrer Masse oder von der Menge ihrer Berührungspunkte, sondern nur von ihrer materiellen Beschaffenheit abhänge. So ist es für die Wirksamkeit wesentliche Bedingung, daß zwischen den Körpern wirklich metallische Berührung stattfindet; die geringste Oxydschicht oder andere Verunreinigung an der Berührungsstelle schwächt die Wirkung sehr bedeutend, oder hebt sie ganz auf.

§. 81. **Fortsetzung.** Man schraube auf das Goldblattelectrometer eine Condensatorplatte von Kupfer, setze auf dieselbe eine Condensatorplatte von Zink, und verbinde die beiden Platten durch einen Kupferdraht, der natürlich mit den nicht gefirnißten Flächen in Berührung gebracht werden muß. Wenn dann nach kurzer Berührung der Kupferdraht weggenommen, und die Zinkplatte aufgehoben wird, so bemerke man sich die Größe der Divergenz der Goldblättchen. Wird dann statt des Kupferdrahts ein Draht von irgend einem anderen Metalle genommen und der Versuch wiederholt, so wird doch stets dieselbe Divergenz der Goldblättchen beobachtet.

Dieses Resultat scheint den in §. 79 unter 2 mitgetheilten Erfahrungen zu widersprechen, nach welchen, je nachdem man verschiedene Metalle nimmt, das Electroscop auch Electricität von verschiedener Intensität

Digitized by Google

anzeigt. Die größere Divergenz der Goldblättchen ist Folge der größeren Spannung, in welcher sich die dem Electroscope mitgetheilte Electricität befindet, und in dem vorhergehenden Paragraph ist noch ausdrücklich bemerkt, daß die Spannung desto größer sei, je weiter die in Berührung gebrachten beiden Metalle in der Spannungsreihe von einander abstehen. Doch wird sich dieser scheinbare Widerspruch leicht lösen lassen, und uns zur Auffindung eines neuen wichtigen Gesetzes führen. Man versteht unter der electrischen Differenz zweier Metalle den Unterschied der mit dem Vorzeichen der betreffenden Electricitäten genommenen Spannungen, wenn zwei Stücke dieser Metalle mit einander in Berührung gebracht werden. Da sie also von der Größe der Spannungen abhängt, so ist sie für dieselben zwei Metalle nach dem vorhergehenden Paragraph stets dieselbe. Wird nun in unserem Versuche ein Kupferdraht in Anwendung gebracht, so wird durch die Berührung desselben mit der Zinkplatte Electricität erregt. Die auf der Zinkplatte frei werdende positive Electricität wird an der Firnißschicht des Condensators condensirt, während die negative des Kupferdrahts an die Kupferplatte durch Leitung übergeht, und dort ebenfalls condensirt wird. Wenn dann nach Wegnahme des Drahtes und Aufheben der Zinkplatte die Goldblättchen divergiren, so ist also ihre Divergenz der electrischen Differenz zwischen Zink und Kupfer proportional. Verbinden wir jetzt die beiden Condensatorplatten statt mit Kupfer z. B. mit Zinn, so haben wir zwei verschiedene Electricitätserregungen, 1) durch die Berührung des Zinks mit dem Zinn und 2) durch die Berührung des Zinns mit dem Kupfer. Die kupferne Condensatorplatte nimmt also die freie Electricität des Zinns, welche durch Berührung des Zinks und Zinns erregt wurde, als Leiter auf, zugleich wird aber auf derselben durch die Berührung mit dem Zinn noch eine weitere Quantität negativer Electricität erregt, wodurch die Spannung der auf ihr angehäuften Electricität erhöht wird. Da nun die Divergenz der Goldblättchen wieder dieselbe ist, wie bei dem Kupferdraht, so muß die electrische Differenz zwischen Zink und Kupfer gleich sein der electrischen Differenz zwischen Zink und Zinn vermehrt um diejenige zwischen Zinn und Kupfer. Stellen wir endlich die Verbindung der beiden Condensatorplatten durch ein Metall her, das in der Spannungsreihe noch unter Kupfer steht, z. B. durch Platin. Hier haben wir wieder zwei Erregungen, nämlich zwischen Zink und Platin, und dann zwischen Platin und Kupfer. Der Unterschied ist aber der, daß das Kupfer durch das Platin positiv erregt wird, während ihm als Leiter von dem Platin negative Electricität zugeführt wird. Es wird demnach ein Theil der negativen Electricität durch die positive neutralisirt, und dadurch die Spannung vermindert werden. Da die Divergenz der Goldblättchen abermals dieselbe ist, so muß also die electrische Differenz zwischen Zink und Platin, vermindert um die electrische Differenz zwischen Kupfer und Platin, gleich sein derjenigen zwischen Zink und Kupfer, oder, in anderen Worten, die electrische Differenz zwischen Zink und Kupfer, vermehrt um die zwischen Kupfer und Platin, muß der electrischen Differenz zwischen Zink und Platin gleich sein. Wir lernen aus diesen Versuchen also, daß die electrische Differenz je zweier beliebigen Glieder in der Spannungsreihe gleich ist der Summe der electrischen Differenzen der Zwischenglieder. Der scheinbare Wi-

Digitized by Google

ſpielig ſind; in Ketten, welche in neuerer Zeit angegeben wurden, und welche im folgenden Paragraphen näher beſchrieben ſind, auch Zink und Kohle, oder Zink und Platin. Als flüſſigen Leiter nimmt man gewöhnlich die verdünnte Auflöſung eines Salzes (Kochſalz, Salmiak) oder auch eine verdünnte Säure (Schwefelſäure, Salpeterſäure).

Auch bei der Entladung der Leydner Flaſche und ähnlicher Apparate haben wir eine Ausgleichung und Neutraliſirung der 2 entgegengeſetzten Electricitäten kennen gelernt, indem dieſe in entgegengeſetzter Richtung von den beiden Belegen nach dem Schließungsbogen hinſtrömen; wir ſahen auch, daß durch dieſe Entladungen ähnliche chemiſche Zerſetzungen hervorgebracht werden, wenn auch nicht mit der Leichtigkeit, wie wir dies bei der geſchloſſenen galvaniſchen Kette beobachten. Fragen wir nach dem Grunde dieſes Unterſchiedes, ſo kann er in Nichts Anderem liegen, als daß bei der Leydner Flaſche dieſe Strömungen nur momentan ſind, während bei der geſchloſſenen galvaniſchen Kette die Electricitätsquelle, die Berührung der Leiter, fortdauert, und demnach, ſobald eine Ausgleichung ſtattgefunden hat, immer ſofort wieder neue Electricität erregt wird, ſo daß wir hier continuirliche Strömungen erhalten. Wenn gleich eigentlich ſtets 2 Strömungen in entgegengeſetzter Richtung in Betracht kommen, ſo werden wir in dem Folgenden doch einfach von dem electriſchen Strome reden, und darunter, wie dies allgemein gebräuchlich iſt, die Strömung der poſitiven Electricität verſtehen, was um ſo mehr geſchehen kann, da mit der Richtung der einen Strömung zugleich diejenige der anderen ebenfalls bekannt iſt.

Um die Erſcheinungen der geſchloſſenen Kette beſſer zu verſtehen, wird es nöthig, die Vorgänge, welche in derſelben ſtattfinden, näher kennen zu lernen. Ein weſentlicher Unterſchied zwiſchen der offenen und geſchloſſenen Kette iſt der, daß in der offenen, wie wir geſehen haben, nur 2 Electricitätserregungen (zwiſchen Zink und der Flüſſigkeit, und zwiſchen Kupfer und der Flüſſigkeit) ſtattfinden, in der geſchloſſenen aber 3, nämlich außer den obigen beiden auch noch zwiſchen den beiden in Berührung gebrachten Metallen. Durch die letztere geht nach §. 79 poſitive Electricität von dem Kupfer zum Zink, und von dieſem zur Flüſſigkeit als Leiter; durch die Berührung von Zink und Flüſſigkeit geht poſitive Electricität von dem Zink zur Flüſſigkeit und von dieſer zum Kupfer als Leiter. Beide Strömungen finden in derſelben Richtung ſtatt, und verſtärken ſich demnach. Durch die Berührung von Kupfer und Flüſſigkeit geht aber poſitive Electricität von dem Kupfer zur Flüſſigkeit, und von dieſer zum Zink als Leiter. Dieſe dritte Strömung iſt demnach in ihrer Richtung den beiden andern entgegengeſetzt; da ſie aber von allen dreien die ſchwächſte iſt, ſo kann ſie höchſtens einen ihr gleichen Theil der vereinigten beiden anderen aufheben, nicht aber ſie gänzlich vernichten, ſo daß die reſultirende Wirkung aller drei Strömungen ſein muß ein Strom poſitiver Electricität in der Richtung vom Kupfer zum Zink, zur Flüſſigkeit und wieder zum Kupfer.

Erwähnt muß noch werden, daß man, wenn man eine Platte käuflichen Zinks in mit Schwefelſäure angeſäuertes Waſſer bringt, an dem Zink Gasblaſen, welche ſich als Waſſerſtoffgas erweiſen, aufſteigen ſieht, und daß das Zink bei längerer Berührung mit der Flüſſigkeit angegriffen wird, und

Digitized by Google

in der Flüssigkeit ebenfalls schwefelsaures Zinkoxyd nachgewiesen werden kann. Diese Erscheinung erklärt sich ganz einfach, wenn man weiß, daß dem käuflichen Zink stets noch andere Metalle beigemengt sind. Diese, das Zink und die Flüssigkeit bilden also eine geschlossene galvanische Kette, weßhalb derselbe Hergang stattfinden muß, wie oben bei dem zweiten Versuch. Daß die gegebene Erklärung richtig ist, geht daraus hervor, daß, wenn man statt käufliches Zink chemisch reines anwendet, der ganze Vorgang nicht stattfindet. Man kann ihn auch dadurch verhindern, daß man das Zink amalgamirt. Man bedient sich daher bei den galvanischen Ketten in der Regel des amalgamirten Zinks, das man erhält, wenn man das Zink erst mit verdünnter Säure benetzt, dann Queckſilber darauf bringt, das nun begierig an demselben adhärirt, und dieses über die Zinkplatte hin und her streicht.

§. 84. **Veränderliche und constante Ketten.** 1) Wenn man eine Zink-Kupferkette, wie sie in dem vorhergehenden §. 83 beschrieben ist, schließt, so sieht man Anfangs die Wasserstoffgasbläschen an der Kupferplatte ziemlich lebhaft in die Höhe steigen, diese Lebhaftigkeit nimmt aber sehr bald ab, so daß die Gasentwicklung immer schwächer, und nach einiger Zeit ganz unmerklich wird. 2) Dagegen hat man in neuerer Zeit Ketten construirt, bei welchen eine solche rasche Abnahme ihrer Wirksamkeit nicht beobachtet wird. Sie unterscheiden sich von den anderen wesentlich dadurch, daß bei ihnen jeder feste Leiter in einer eigenen Flüssigkeit sich befindet, und daß die beiden Flüssigkeiten dann durch eine poröse Zwischenwand (Thierblasen, unglasirte Thongefäße) von einander getrennt sind. Es haben solcher Ketten hauptsächlich 3 eine weitere Verbreitung gefunden, nämlich a) die Daniell'sche, in welcher die festen Leiter Zink und Kupfer, die flüssigen Leiter verdünnte Schwefelsäure und Kupfervitriollösung sind; das Zink steht in der verdünnten Schwefelsäure, das Kupfer in der Kupfervitriollösung. b) Die Grove'sche Kette wird gebildet von Zink, Platin, verdünnter Schwefelsäure und Salpetersäure; hier befindet sich das Platin in der Salpetersäure. c) Die Bunsen'sche Kette ist zusammengesetzt aus Zink, Kohle (die am besten durch Zusammenbacken von gepulverter, harziger Steinkohle und Koaks im Glühfeuer gebildet wird), Schwefelsäure und Salpetersäure, und die Kohle ist von der Salpetersäure umgeben.

Die ersteren Ketten, deren Wirksamkeit rasch abnimmt, und die aus 2 festen und nur einem flüssigen Leiter zusammengesetzt sind, nennt man veränderliche Ketten, die letzteren dagegen, deren Wirksamkeit längere Zeit sich gleich bleibt, und die durch 2 feste und 2 flüssige Leiter gebildet werden, constante Ketten. Die Ursache, warum die Wirksamkeit der gewöhnlichen Kette so veränderlich, diejenige der letztgenannten Ketten dagegen längere Zeit constant ist, wird in dem §. 93 näher erläutert werden.

§. 85. **Wirkungen der galvanischen Kette.** Schon in §. 83 haben wir 2 verschiedene Wirkungen der galvanischen Kette kennen gelernt, eine mechanische bei der offenen Kette (Bewegung der Goldblättchen des Electroscops) und eine chemische bei geschlossener Kette (Zersetzung des Wassers). Von mechanischen sind weiter keine zu erwähnen, da diese nur von der Electricität in dem Zustande der Spannung (statischen Electricität) hervorgebracht werden, eine Spannung aber bei geschlossener Kette gar nicht möglich, und bei offener Kette nur in geringem Grade vorhanden ist, so

Digitized by Google

daß sie mit der Spannung in der Leydner Flasche oder der Franklin'schen Tafel kaum verglichen werden kann. Zu den chemischen Wirkungen muß auch die Zersetzung des Kupfervitriols in der Daniell'schen Kette gerechnet werden. So oft ein Oxyd (eine Verbindung eines Körpers mit Sauerstoff) durch die galvanische Kette zersetzt wird, finden wir stets, daß der Sauerstoff an dem positiven Metalle (an dem in der Spannungsreihe voranstehenden) ausgeschieden wird. Wird aber ein Salz (eine Verbindung einer Säure mit einer Base) zersetzt, so wird an dem positiven Metalle die Säure, die Base dagegen an dem negativen Metalle ausgeschieden, doch wird die Base oft wieder zerlegt, indem sich ihr Sauerstoff mit dem Wasserstoff des Wassers der Salzlösung verbindet, so daß an dem negativen Metalle nicht die Base selbst, sondern nur ihr Radical beobachtet wird. In der Daniell'schen Kette finden wir z. B. an der Kupferplatte kein Kupferoxyd abgelagert, sondern metallisches Kupfer. Jetzt wird man auch die Entstehung des s. g. Bleibaums verstehen. Taucht man nämlich in eine verdünnte Auflösung von Bleizucker (essigsaures Bleioxyd) einen Zinkstab, so scheidet sich metallisches Blei an dem Zink aus, weil Zink zu dem Sauerstoff eine größere chemische Verwandtschaft hat, als das Blei, und folglich diesem Sauerstoff entzieht. Nun haben wir aber eine galvanische Kette, bestehend aus Zink, Blei und der Bleizuckerlösung. In dieser wird die Bleizuckerlösung zerlegt, das Oxyd dieses Salzes, das Bleioxyd, geht zu dem negativen Metalle der Kette, zu dem Blei, aber der Sauerstoff des Oxyds verbindet sich gleich mit dem Wasserstoff der Lösung zu Wasser, und an dem Blei wird demnach nur metallisches Blei in kleinen Schüppchen ausgeschieden, durch welche nach und nach der Bleibaum gebildet wird.

Da von den unedlen Metallen manche eine große Verwandtschaft zu dem Sauerstoff haben, und diesen der Luft oder dem Wasser entziehen, wann sie mit diesen Körpern in Berührung sind, und dadurch rosten, so sucht man diesem Uebelstande dadurch zu begegnen, daß man die zu schützenden Metalle mit einem anderen, welches in der Spannungsreihe ihnen voransteht, in Berührung bringt, und dadurch eine galvanische Kette construirt, in der dann der Sauerstoff an dem hinzugebrachten Metalle ausgeschieden wird, wodurch das andere vor Oxydirung geschützt wird. So rieth Davy, um die kupfernen Beschläge der Seeschiffe vor dem Rosten zu wahren, und ihnen dadurch eine größere Dauer zu geben, Streifen von Zinn, Eisen oder Zink an denselben zu befestigen. Ebenso wendet man in neuerer Zeit statt des gewöhnlichen Eisenblechs zur Dachbedeckung, Schiffsbekleidung u. s. w. verzinktes oder s. g. galvanisirtes Eisen an, da das Eisen durch einen dünnen Zinküberzug vor dem Rosten geschützt wird.

Auch die übrigen electrischen Wirkungen, welche wir oben bei der Reibungselectricität kennen gelernt haben, Licht-, Wärme-, physiologische und magnetische Wirkungen, finden wir bei der galvanischen Electricität wieder, zum Beweise, daß beide identisch sind. Magnetische Wirkungen sollen hier keine angeführt werden, weil von ihnen später in eigenen §§. ausführlich gehandelt werden muß, von den übrigen dagegen sollen folgende erwähnt werden. Wenn man mit den beiden Metallplatten der Kette kurze Stücke eines dicken Kupferdrahts verbindet, bringt dann die beiden freien Drahtenden mit einander in Berührung, und trennt sie hierauf wieder, so sieht man bei jeder Trennung einen kleinen hellen Funken, namentlich wenn

Digitized by Google

dieſe Enden vorher amalgamirt wurden. Verbindet man aber die beiden Drahtenden durch ein kleines Stück ſehr feinen Silber- oder Platindrahts, ſo geräth dieſes in's Glühen, ja es kann ſogar, wenn die Kette recht wirkſam iſt, geſchmolzen werden. Bringt man das eine Drahtende auf die Zunge, das andere unter dieſelbe, ſo daß die Zunge in den Schließungsdraht eingeſchaltet iſt, ſo empfindet man einen eigenthümlichen Geſchmack, von welchem an den Drähten einzeln genommen Nichts wahrgenommen wird. Wenn man bei geſchloſſenen Augen mit dem einen Drahtende das befeuchtete Augenlied berührt, ſo nimmt man in dem Augenblicke, in welchem man mit dem anderen die Lippen in Berührung bringt, eine Lichterſcheinung wahr. Zu den phyſiologiſchen Wirkungen muß auch der Verſuch mit dem Froſchpräparat, der zur Entdeckung der galvaniſchen Electricität Veranlaſſung gegeben hat, gerechnet werden; denn auch da haben wir eine geſchloſſene galvaniſche Kette, in welcher der flüſſige Leiter durch das Froſchpräparat vertreten iſt. Der Verſuch iſt leichter mit einem Blutegel anzuſtellen, welchen man auf eine Kupfermünze legt, die auf einer Zink- oder Silberplatte liegt; ſo oft er das Zink oder Silber berühren will, geräth er in Zuckungen.

§. 86. **Volta's Säule; galvaniſche Batterien.** Schon Volta kam in dem Jahre 1800 auf den Gedanken, daß, grade wie bei der Reibungselectricität die Wirkung der Leydner Flaſche durch eine Verbindung mehrerer derſelben zu einer electriſchen Batterie verſtärkt werden könne, man ſo auch bei der galvaniſchen Electricität erhöhte Wirkungen erhalten werde, wenn man mehrere einfache Ketten mit einander verbindet. Er conſtruirte deßhalb die nach ihm benannte Volta'ſche Säule, die aber jetzt durch die Anordnung viel zweckmäßigerer Apparate faſt ganz außer Gebrauch geſetzt worden iſt. Er ordnete eine gleiche Anzahl runder oder viereckiger Kupferplatten, ſolcher Zinkplatten, und Pappſcheiben oder Tuch- oder Filzlappen, welche letzteren mit einer Löſung von Kochſalz oder Salmiak getränkt waren, auf einem Geſtelle zwiſchen Glas- oder Holzſtäben, ſo daß ſie eine Säule bildeten, und daß er von Unten nach Oben immer 2 verſchiedene Metallplatten, und auf dieſe eine angefeuchtete Scheibe legte, doch mit der Rückſicht, daß die Metalle immer in derſelben Ordnung auf einander folgten, daß alſo, wenn eine Zinkplatte zu unterſt lag, auf jede feuchte Scheibe wieder eine Zinkplatte zu liegen kam, und die ganze Säule mit einer Kupferplatte ſchloß. Wenn wir alſo eine Kupferplatte mit K, eine Zinkplatte mit Z und eine feuchte Scheibe mit F bezeichnen, ſo war die Anordnung ZKFZKF . . . ZK, oder auch KZFKZF . . . KZ. Die beiden Endplatten der Säule heißen die Pole, und zwar, da das Zink durch das Kupfer poſitiv und das Kupfer durch das Zink negativ erregt wird, die Zinkplatte der poſitive oder Zinkpol, und die Kupferplatte der negative oder Kupferpol. Später hat man die beiden Endplatten ganz weggelaſſen, ſo daß die Anordnung folgende wurde KFZKFZ . . . KFZ oder ZFKZFK . . . ZFK. Es konnte dies auch geſchehen, da ſie mit dem flüſſigen Leiter nicht in Berührung ſtanden, und die Electricitätserregung durch die Berührung zweier Metalle doch viel unbedeutender iſt, als die zwiſchen einem Metalle und einer Flüſſigkeit. Die Richtung des Stroms mußte dadurch unverändert bleiben, da wir geſehen haben, daß in der Kette der Strom vom Zink durch die Flüſſigkeit zum Kupfer geht, und da die beiden End-

Digitized by Google

platten, abgesehen von der schwachen Erregung durch die mit ihnen verbundene Platte, gewissermaßen nur als Leiter dienten. Bei dieser neuen Combination ist nun die Kupferplatte der positive, und die Zinkplatte der negative Pol. Es war dies zu erwähnen nothwendig, damit nicht Verwirrung in der Bezeichnung entstünde, um so mehr, als noch Manche auch in der abgeänderten Combination der Säule die Kupferplatte den Zinkpol, und die Zinkplatte den Kupferpol nennen *).

Da galvanische Ketten in sehr verschiedener Form construirt worden sind, so ist auch, je nachdem Ketten der einen oder der anderen Form mit einander verbunden werden, die Construction der galvanischen Batterien eine mannichfaltige, deren nähere Beschreibung dem Zwecke dieses Buches fremd ist. Nur die Regel muß bei allen festgehalten werden, daß stets das positive Metall der einen Kette mit dem negativen der nächstfolgenden leitend verbunden ist. Auch die Säule oder Batterie heißt offen, so lange nicht zwischen den 2 festen Endgliedern eine leitende Verbindung hergestellt ist; in letzterem Falle heißt sie geschlossen. In Hinsicht des electrischen Zustandes der offenen Säule oder Batterie ist es nicht gleichgültig, ob sie isolirt oder nicht isolirt ist. Ist sie isolirt, so zeigt sich die Mitte derselben ganz unelectrisch, nach den beiden Enden aber nimmt die Spannung der freien Electricität in arithmetischer Progression zu, nach dem positiven Pole die der freien positiven Electricität, nach dem negativen Pole der freien negativen Electricität. Ist aber der eine Pol leitend mit der Erde verbunden, so zeigt dieser Pol keine Electricität, die dem anderen Pole zukommende Electricität wächst aber von hier bis zu diesem zweiten Pole durch die ganze Säule in arithmetischer Progression, und erreicht dort eine doppelt so große Spannung, als im isolirten Zustande der Säule. Ebenso zeigt sich bei einer geschlossenen Batterie der resultirende Strom als eine Summe von Strömen, welche von den einzelnen Elementen (einfachen Ketten der Batterie) geliefert werden, so daß für den Strom eines einzelnen Elements die übrigen Elemente nur die Stelle eines Leiters zu vertreten scheinen. Diese Erscheinungen zu erklären, ist vielfach versucht worden, indessen ist es noch nicht gelungen, eine Erklärung aufzufinden, welche allgemeine Verbreitung gefunden hätte. Wollte man freilich mit Volta von der electromotorischen Kraft der Flüssigkeit ganz absehen, und die Flüssigkeit nur als Leiter betrachten, so würde die Erklärung wenigstens der Erscheinungen der isolirten offenen Säule keine Schwierigkeiten darbieten. Denn hätten wir die Säule ZKFZKFZKFZKFZKFZK, und ist e die Electricitätsmenge, die auf jeder Platte durch Berührung mit der anderen frei wird, so findet in der Säule vermöge der Electricitätserregung der ersten Zink- und Kupferplatte folgende Vertheilung der Electricität statt:

*) Die Volta'sche Säule hatte auch das Unbequeme, daß sie nach jedem Gebrauch ganz aus einander genommen werden, und daß vor jeder neuen Zusammensetzung sämmtliche Platten tüchtig geschenert werden mußten, weil sonst eine sich gebildet habende Oxydschicht alle Wirksamkeit vernichten konnte.

Digitized by Google

	Z	KF	Z	K	FZ	K	FZ	K	FZ	K	FZ	K
	+e	−e	−e	−e	−e	−e	−e	−e	−e	−e	−e	−e*)
durch die Erregung des zweiten Plattenpaares	+e	+e	+e	−e	−e	−e	−e	−e	−e	−e	−e	−e
des dritten Plattenpaares	+e	+e	+e	+e	+e	−e	−e	−e	−e	−e	−e	−e
des vierten Plattenpaares	+e	+e	+e	+e	+e	+e	+e	−e	−e	−e	−e	−e
des fünften Plattenpaares	+e	+e	+e	+e	+e	+e	+e	+e	+e	−e	−e	−e
des letzten Plattenpaares	+e	+e	+e	+e	+e	+e	+e	+e	+e	+e	+e	−e
also durch sämmtliche Erregungen	+6e	+4e	+4e	+2e	+2e	0	0	−2e	−2e	−4e	−4e	−6e

*) Weil alle rechtsliegenden Glieder vorläufig nur als Leiter angesehen werden.

§. 87. **Wirkungen der Säule oder Batterie.** Auch bei der Säule oder Batterie sind die mechanischen Wirkungen stets nur unbedeutend, weil bei ihr ebenso wenig, wie bei der einfachen Kette, trotz der fortdauernden Erregung die freie Electricität zu einem hohen Grade der Spannung oder Intensität gebracht werden kann, da alle Glieder Electricitätsleiter sind, und daher auch fortdauernd eine Ausgleichung der beiden entgegengesetzten Electricitäten stattfindet. Zu den physiologischen Wirkungen der einfachen Kette kommt bei der Batterie auch noch der Erschütterungsschlag hinzu. Da dieser jedoch ebenfalls durch die Größe der Spannung bedingt wird, so ist es nothwendig, eine recht vielplattige Säule anzuwenden. Da ferner die Epidermis ein schlechter Leiter ist, so wird die Stärke des Erschütterungsschlags vermehrt, wenn man die Hände, mit welchen man die Polenden anfaßt, zuvor benetzt hat, auch wenn man die Anzahl der Berührungspunkte dadurch vermehrt, daß man an den Polardrähten größere cylindrische Metallstücke befestigt, und diese in die Hände nimmt. Der Erschütterungsschlag wird nur beim Schließen und dann wieder beim Oeffnen der Batterie verspürt, während des Geschlossenseins dagegen hört fast alle Empfindung auf. Da man diesen Erschütterungsschlägen eine medicinische Wirksamkeit zuschreibt, und sie bei gewissen Uebeln schon öfter mit Erfolg angewandt hat, aber durch eine schnelle Aufeinanderfolge der Schläge die Wirkung auf die Nerven jedenfalls gesteigert werden muß, so hat Neeff, um diesen letzteren Zweck zu erreichen, einen eigenen Apparat construirt, dem er den Namen Blitzrad gegeben hat. Er besteht aus einer Kupferscheibe, deren Drehungsaxe mit dem einen Pol der Säule in Verbindung steht, und an deren Rande sich kleine runde Löcher befinden, die mit Ebenholz oder Glas (einem Nichtleiter) ausgefüllt sind. Auf der Scheibe ruht federnd ein ziemlich dicker Kupferdraht, der mit dem anderen Pole verbunden ist. Wird nun die Scheibe mittelst einer Kurbel rasch gedreht, so gleitet der Draht bald über das Kupfer, bald über das Ebenholz. So oft er aber auf dem Kupfer ruht, ist die Kette geschlossen, und so oft er über Ebenholz geht, geöffnet. Schaltet man nun in den Schließungsbogen den menschlichen Körper ein, so können durch sehr schnelles Umdrehen der Scheibe die Schläge auch bei einer nur aus wenigen Elementen bestehenden Batterie sehr wahrnehmbar, bei größeren Batterien aber fast unerträglich gemacht werden. Zu medicinischem Gebrauche dienen jetzt in der Regel andere electrische Apparate, durch welche der Strom in rascher Aufeinanderfolge durch den Apparat selbst ohne Anwendung des Blitzrades unterbrochen und wieder hergestellt wird. Einige derselben werden später noch erwähnt werden.

Digitized by Google

Was die thermischen (θέρμη, Wärme) Wirkungen einer Batterie betrifft, so kann durch dieselbe ein viel dickerer und längerer Platindraht glühend gemacht werden, als durch die einfache Kette. Nimmt man statt des Platindrahtes Eisendraht, so wird dieser unter lebhaftem Funkensprühen geschmolzen. Blattgold und Blattsilber werden verflüchtigt, wobei namentlich Gold ein ausgezeichnet schönes grünes Licht zeigt. Ueberhaupt hat man über die Wärmewirkung ermittelt, daß sie sich nach der Menge der strömenden Electricität richtet. Deßhalb nimmt man zu solchen Versuchen nur Batterien von wenigen Elementen, deren Platten aber größere Flächen haben. Ja man kann viele dieser Versuche schon mit einer einfachen Kette mit großen Platten anstellen (Hare's Deflagrator oder Verbrenner); man kann auch die Batterie so combiniren, daß alle positiven Platten, sowie alle negativen Platten mit einander leitend verbunden werden, denn dann bildet ja die Batterie nur eine einfache Kette mit großen Platten. Ferner wird aber auch die Größe der thermischen Wirkungen noch bedingt durch die Widerstände, welche die strömende Electricität in dem zu erwärmenden Leiter erfährt, sie wächst mit diesem Widerstande. Dies geht daraus hervor, daß die Wirkung unter sonst gleichen Umständen desto bedeutender ist, je dünner der angewandte Draht ist, und daß sie in einem schlechteren Electricitätsleiter stärker hervortritt, als in einem besseren. Ein ebenso langer und ebenso dicker Eisendraht wird schon geschmolzen, wenn ein Platindraht nur glüht. Hieraus erklärt sich auch das sonderbare Verhalten, daß, wenn ein Polardraht aus gleich dicken und gleich langen Stücken Silber- und Platindraht besteht, bei Anwendung einer stark wirkenden Batterie nur die Platinstücke, wenn aber Platin und Eisen genommen wird, nur die Eisenstücke glühend werden. Wenn die Wärmeentwicklung nicht zu rasch erfolgt, so kann man stets beobachten, daß das Glühen an demjenigen Ende des Drahts, welches dem positiven Pole zugekehrt ist, seinen Anfang nimmt. Die Wärmeentwicklung überhaupt scheint eine Verrichtung zu sein, welche dem positiven Pole ganz speciell zukommt, wie man sich durch den folgenden Versuch überzeugen kann: wenn man eine starke Batterie durch 2 in scharfe Kegel auslaufende Eisencylinder entlädt, die mit ihren Spitzen gegen einander gekehrt sind, so kann man sich durch das Gefühl überzeugen, daß der am positiven Pol befindliche Cylinder warm wird, während der am negativen Pole noch keine Zunahme der Temperatur zeigt. Peltier hat aber auch die Entdeckung gemacht, daß durch den electrischen Strom auch Kälte erzeugt werden kann. Man weist dies durch den Versuch dadurch nach, daß man ein Wismuth- und ein Antimonstäbchen zusammenlöthet und dann luftdicht durch eine Kugel eines Differentialthermometers einkittet, so daß die Enden auf beiden Seiten der Kugel noch herausstehen. Verbindet man nun die beiden Enden mit den beiden Poldrähten eines nicht allzu starken Stromes, so sieht man, wenn der Strom von dem Wismuth zu dem Antimon geführt wird, die Flüssigkeit in dem Schenkel, durch dessen Kugel das zusammengelöthete Stäbchen geführt ist, steigen, weil die das Stäbchen umgebende Luft abgekühlt wird, und sich dadurch zusammenzieht. Geht der Strom dagegen von dem Antimon zu dem Wismuth, so fällt die Flüssigkeit, zum Beweise, daß in diesem Falle an der Löthstelle Wärme entwickelt wird.

Bei den Lichtwirkungen der Batterie sind wohl die interessantesten

Digitized by Google

Versuche folgende. Man verbinde mit den Poldrähten 2 conisch zulaufende, und in einer Spitze sich endende Kohlenstücke (sehr wirksam sind auch solche Stücke, welche aus derselben Masse gemacht sind, wie die Bunsen'schen Kohlencylinder), und, sobald die Batterie geschlossen wird, indem man die Spitzen der Kohlen in Berührung bringt, sieht man die Spitzen glühend werden, und dabei ein äußerst blendend weißes Licht verbreiten, das wohl durch stark glühende, verflüchtigte Kohlentheilchen hervorgerufen wird. Man kann den Versuch selbst so anstellen, daß die Kohlenspitzen unter Wasser einander genähert werden, wenngleich das Licht dann nicht mit derselben Intensität auftritt. Auf dem Glühen der Kohlenspitzen beruht das in neuerer Zeit öfter genannte Solarlicht (sol Sonne, sonnenähnliches Licht), durch welches man von einem Punkte aus sehr große Räume beleuchten will, wozu sonst viele Hunderte von Lichtflammen erfordert wurden. Wendet man eine sehr starke Batterie von etwa 30 bis 50 Elementen und mehr an, so wächst dadurch nicht nur die Intensität des Lichtes, sondern man kann auch die Kohlenspitzen, wenn einmal der Strom übergeht, nach und nach ziemlich weit von einander entfernen, und erhält dann die schöne Erscheinung eines Lichtbogens, der durch die glühenden Kohlentheilchen, welche von dem einen Pole nach dem anderen übergeführt werden, gebildet wird (vergl. Cassselmann über die galvanische Kohlenzinkkette und einige mit derselben angestellte Beobachtungen. Marburg 1844).

Wie die Wärmeentwicklung eine Funktion des positiven Pols war, so hat Neeff zuerst nachgewiesen, daß die Entwicklung des electrischen Lichtes dem negativen Pole eigenthümlich ist. Wenn man nämlich eine schwache Batterie durch 2 feine Platindrähte schließt, die man aber dadurch, daß man sie schnell hinter einander gegenseitig nahe bringt, und wieder etwas von einander entfernt, verhindert glühend zu werden, so beobachtet man vermittelst einer Loupe am Drahtende des negativen Pols, daß dieses von blendend weißen Pünktchen bedeckt ist, die oft ihre Stelle wechseln.

Die magnetischen Wirkungen sollen, wie schon oben bemerkt wurde, in eigenen Paragraphen besprochen werden, aber auch die chemischen Wirkungen der Batterie haben eine solche Wichtigkeit erlangt, daß wir ihnen nothwendig in der Folge einige besondere Paragraphen widmen müssen.

§. 88. Trockne oder Zamboni'sche Säulen; das Bohnenberger-Bennet'sche Goldblattelectroscop. Man hat auch Säulen construirt, bei welchen gar kein flüssiger Leiter in Anwendung kommt, und ihnen den Namen trockne Säulen im Gegensatz zu den gewöhnlichen, die dann hydroelectrische Säulen genannt werden, beigelegt. Zamboni, nach welchem solche Säulen auch Zamboni'sche Säulen heißen, schichtete zu diesem Behufe eine große Anzahl von Scheibchen aus unächtem Gold- und Silberpapier (Kupfer und Zinn) fest auf einander, so daß die metallischen Flächen sich stets zugekehrt waren, und durchgehends in derselben Ordnung abwechselten, also entweder die Kupfer- oder die Zinnseite stets nach Unten zu liegen kam. Die unbelegte Papierseite vertritt hier die Stelle des flüssigen Leiters, wozu es sich auch als hygroscopische Substanz, welche niemals absolut trocken wird, recht gut eignet. Die Scheibchen werden entweder in einer Glasröhre zusammengepreßt, oder man umgießt sie im gepreßten Zustande ringsum mit geschmolzenem Schwefel oder Schellack, um sie vor dem Einflusse der Luft zu schützen. An den beiden Polen werden stärkere Me-

Digitized by Google

tallplatten befestigt. Es wird auf diese Weise möglich, recht vielplattige Säulen zu erhalten, die doch nur einen sehr unbedeutenden Raum einnehmen. Auch brauchen sie natürlich vor neuem Gebrauche nie auseinander genommen zu werden. Durch die große Anzahl von Platten zeigen solche Säulen stets einen sehr hohen Grad der Spannung, und sind dadurch zu mechanischen Wirkungen besonders geeignet. Stromwirkungen bringen sie indeß fast gar nicht hervor, und zwar deßwegen, weil das unbelegte Papier im Verhältniß zu den Flüssigkeiten nur eine sehr unbedeutende Leitungsfähigkeit besitzt, und dadurch die in den einzelnen Elementen erregte Electricität nur langsam bis zu den Polen durchdringt. Die Zamboni'schen Säulen sind bei dem empfindlichsten unserer Electroscope, dem Bohnenberger-Bennet'schen Goldblattelectroscope in Anwendung gebracht. Es unterscheidet sich dieses von dem Bennet'schen Goldblattelectroscope dadurch, daß in dem Glascylinder sich 2 verticale Zamboni'sche Säulchen befinden, von welchen das eine seinen positiven, das andere seinen negativen Pol oben hat, ferner dadurch, daß an dem Metalldrahte nicht zwei Goldblättchen, sondern nur ein einziges herabhängt, und zwar so, daß es grade in die Mitte zwischen die zwei Säulchen zu hängen kommt. So lange nun das Goldblättchen unelectrisch ist, wird es von beiden Polen gleich stark angezogen, und bleibt daher in Ruhe. Sobald ihm aber nur eine ganz geringe Menge Electricität mitgetheilt wird, wird es von dem einen Pole angezogen und von dem anderen abgestoßen. Die Pole sind in der Regel auch noch durch + und — bezeichnet, so daß dieses Electroscop auch den Vortheil darbietet, daß man unmittelbar erkennen kann, ob dem Goldblatt positive oder negative Electricität mitgetheilt worden sei. Dieses Electroscop hat durch Becquerel und Fechner noch eine Verbesserung erfahren, die im Wesentlichen darin besteht, daß sie die 2 vertical stehenden Säulchen durch eine horizontal liegende Säule mit verticalen Polplatten ersetzten.

Eine fernere Anwendung von den Zamboni'schen Säulen hat man bei dem s. g. electrischen perpetuum mobile gemacht. Zu dem Ende verfertigt man 2 Zamboni'sche Säulen von mehreren tausend Paaren, die vertical so aufgestellt werden, daß bei beiden die gleichnamigen Pole eine entgegengesetzte Lage haben. Die beiden unteren ungleichnamigen Pole werden leitend mit einander verbunden, so daß beide Säulen eigentlich nur eine einzige bilden von doppelter Plattenzahl. Zwischen den beiden oberen ungleichnamigen Polen wird ein leichtes metallisches Pendel isolirt aufgehängt. Das Ganze ist in einen Glascylinder eingeschlossen, um es gegen Luftströmungen zu schützen. Hängt das Pendel Anfangs nicht ganz genau in der Mitte, so wird es von dem näheren Pole angezogen, erhält von demselben Electricität mitgetheilt, und wird hierauf wieder abgestoßen. In diesem Zustande wird es aber jetzt von dem anderen Pole angezogen, seine Electricität gleicht sich mit einem Theile der an diesem Pole angehäuften aus, dann bekommt es von dem noch übrigen Theil Electricität mitgetheilt, und wird nun ebenfalls abgestoßen, aber von dem ersten Pol wieder angezogen, und so geht das Spiel des Pendels fort. Die Electricität, welche durch das Pendel eines Theils, und durch die umgebende Luft anderen Theils den Polen fortwährend entzogen wird, wird durch die fortdauernden Erregungen in den Säulen immer wieder ersetzt.

§. 89. **Chemische Wirkungen der galvanischen Batterie.** Außer den

Digitized by Google

ſchon erwähnten Zerſetzungen durch galvaniſche Electricität können durch die galvaniſche Batterie noch eine große Anzahl anderer Körper in ihre Beſtandtheile zerlegt werden. Iſt der Körper, welcher zerlegt wird, ein Oxyd, ſo tritt der Sauerſtoff ſtets am poſitiven Pole, das Radical am negativen Pole auf. Unter den Zerlegungen von Oxyden iſt für die Wiſſenſchaft diejenige des Kali und des Natron, welche Davy (1807) zuerſt mit Hilfe einer ſehr mächtigen Batterie bewirkte, die merkwürdigſte, weil man bis dahin beide Körper, die man auf chemiſchem Wege nicht zerlegen konnte, für einfache Stoffe halten mußte, während man jetzt weiß, daß es Oxyde zweier Metalle, des Kaliums und des Natriums, ſind, die auf dieſem Wege entdeckt wurden. Aber nicht bloß Oxyde, ſondern auch Salze werden durch den galvaniſchen Strom zerlegt, und zwar ſo, daß an dem poſitiven Pole die Säure, an dem negativen die Baſis ausgeſchieden wird, wie man deutlich aus folgendem Verſuch erſieht. Man nehme eine Uförmig gebogene Glasröhre, bringe in dieſelbe eine Glauberſalzlöſung, gebe derſelben durch Zuſatz von etwas Lackmustinctur eine violette Färbung. Wenn man dann in den einen Schenkel den poſitiven, in den anderen den negativen Poldraht eintaucht, ſo ſieht man bald die Flüſſigkeit in dem erſteren roth, in dem letzteren blau werden. Bei Erwähnung der Daniell'ſchen Kette ſahen wir indeß, daß aus einer Kupfervitriollöſung an dem negativen Pole metalliſches Kupfer ausgeſchieden wird. Aehnliche Abweichungen ſehen wir auch noch in anderen Fällen. Es kommt dies aber daher, daß nicht nur das Salz, ſondern auch das Löſungsmittel desſelben, alſo in den meiſten Fällen das Waſſer, zu gleicher Zeit zerlegt wird, und daß von den verſchiedenen ausgeſchiedenen Beſtandtheilen einige ſogleich wieder chemiſch auf einander einwirken, ohne daß dabei der galvaniſche Strom eine Rolle ſpielte. So müſſen wir uns bei der Kupfervitriollöſung die Sache folgendermaßen denken. Der Kupfervitriol wird zerſetzt in Schwefelſäure, welche an den poſitiven Pol, und Kupferoxyd, welches an den negativen Pol geht. Zugleich wird aber auch das Waſſer zerſetzt in Sauerſtoff, der ſich ebenfalls an den poſitiven, und Waſſerſtoff, der ſich an den negativen Pol begibt. Der frei gewordene Waſſerſtoff reducirt aber ſofort das Kupferoxyd, entzieht ihm den Sauerſtoff, und vereinigt ſich mit demſelben zu Waſſer.

Die Zerlegung der Körper durch den galvaniſchen Strom beſchränkt ſich nicht blos auf Sauerſtoffverbindungen, ſondern findet auch bei vielen Verbindungen von ſ. g. Salzbildnern mit Metallen ſtatt. Oben wurde ſchon das Jodkalium erwähnt als ein durch den Strom ſehr leicht zerſetzbarer Körper. Bei Zerſetzungen eines Körpers aus dieſer Klaſſe tritt ſtets das Metalloid am poſitiven und das Metall am negativen Pol auf, während, wenn ein ſolches Metalloid mit Sauerſtoff verbunden iſt, es doch am negativen Pole ausgeſchieden wird. Doch darf man nicht denken, daß vielleicht alle zuſammengeſetzten Körper durch den galvaniſchen Strom in ihre Beſtandtheile zertrennt werden können; ſondern es iſt dies nur bei ſolchen Körpern möglich, welche die Electricität leiten, damit ſie, in den Schließungsbogen eingeſchaltet, auch dem Strome einen Durchgang durch ihre Maſſe geſtatten. Ferner iſt nöthig, daß die Theilchen derſelben eine hinreichende Beweglichkeit beſitzen. Deßwegen wendet man den Körper entweder im geſchmolzenen Zuſtande, oder in Auflöſungen an, oder auch wohl in Geſtalt von feinen Pulvern. Wenn aber auch dieſe Bedingungen bei

Digitized by Google

einem Körper erfüllt sind, so ist er deßwegen doch noch nicht durch den Strom zerlegbar.

Nach Faraday nennt man die Zerlegung eines Körpers durch Einwirkung des electrischen Stromes Electrolyse (λύω ich löse) und einen der Electrolyse fähigen Körper einen Electrolyten. Die Pole heißen Electroden (ὁδός Weg), und zwar speciell der positive Pol oder die Eintrittsstelle des Stroms in den Electrolyten Anode (ἀνά hinauf) und der negative Pol oder die Austrittsstelle des Stroms aus dem Electrolyten Kathode (κατά hinab). Die Bestandtheile, in welche der Electrolyt zerlegt wird, nennt er Jonen (ἰών gehend), denjenigen, welcher sich an die Anode begibt, das Anion, und denjenigen, welcher an der Kathode ausgeschieden wird, das Kation. Ferner suchte Faraday nachzuweisen, daß die Verhältnisse, in welchen die Bestandtheile eines Körpers zusammengesetzt sind, von wesentlichem Einfluß darauf sind, ob ein Körper ein Electrolyt ist oder nicht, er suchte namentlich für die binären Verbindungen zu zeigen, daß nur solche Electrolyten seien, bei welchen immer ein Aequivalent des einen Elements mit einem Aequivalent des anderen verbunden ist, und daß, wenn wir auch andere Körper zerlegt werden sehen, diese Zerlegung doch nicht eine unmittelbare Folge des electrischen Stromes sei, sondern als eine secundäre Zerlegung angesehen werden müsse, ähnlich wie wir oben eine solche secundäre Zerlegung bei der Reducirung des Kupferoxyds durch den ausgeschiedenen Wasserstoff in metallisches Kupfer haben kennen gelernt.

§. 90. **Fortsetzung; Nobili'sche Farbenringe, Galvanoplastik, Galvanographie, Galvanokaustik, galvanische Vergoldung u. s. w.** Von den Zersetzungen der Metallsalze durch den galvanischen Strom hat man verschiedene, zum Theil schon technisch sehr wichtig gewordene Anwendungen gemacht. Einiges davon soll hier kurz erwähnt werden. Man lasse die negative Electrode in ein Platinplättchen, die positive in einen spitzen Platindraht endigen, lege auf die negative Electrode ein Platin-, Silber- oder Neusilberblech, und bringe nun zwischen die beiden Pole eine Lösung von essigsaurem Bleioxyd oder essigsaurem Kupferoxyd (auch noch andere Metallsalzlösungen sind dazu geeignet). Sobald der Strom cursirt, bilden sich auf dem Bleche, wenn die Platindrahtspitze nicht zu weit absteht, concentrische Ringe von verschiedenen Farben, welche alle die Stelle, wo die verlängerte Drahtspitze das Blech treffen würde, zum Mittelpunkt haben. Die Erscheinung wurde zuerst von Nobili beobachtet, deßwegen heißen nach ihm diese Ringe Nobili'sche Farbenringe. Es kann keinem Zweifel unterliegen, daß diese Ringe durch metallische Ablagerungen gebildet werden (bei Anwendung von essigsaurem Bleioxyd ist es Bleiüberoxyd, bei Anwendung eines Manganſalzes Manganüberoxyd). Die verschiedenen Farben dürften sich daraus erklären, daß die Dicke der Ablagerungen von der Mitte aus immer mehr abnimmt, wie ähnliche Erscheinungen in der Optik wahrscheinlich machen. Böttger hat ein Verfahren veröffentlicht, wie man statt der farbigen Ringe einen einfarbigen Ueberzug erhalten könne.

Durch die Ausscheidung des metallischen Kupfers aus einer Kupfervitriollösung wurde Jacobi zur Erfindung der Galvanoplastik (bildende Kunst durch den galvanischen Strom) geführt. Man versteht unter Galvanoplastik die Kunst, plastische Gegenstände, wie Münzen, Gypsabdrücke, Holzschnitte, Kupferstiche, Statuen u. d. gl. durch Anwendung des galva-

Digitized by Google

nischen Stroms in Kupfer vollkommen nachzubilden. Man wendet zu dem Ende gewöhnlich eine einfache Daniell'sche Kette an, da die ausgeschiedenen Kupfertheilchen nur dann eine feste compacte Masse von gleichförmiger Dicke bilden, wenn die Ausscheidung nicht zu rasch vor sich geht. Den abzubildenden Gegenstand kann man, wenn er aus einem die Electricität leitenden Stoffe besteht, selbst unmittelbar in der Kette die Kupferplatte vertreten lassen. Nur ist es gut, ihn vorher mit wenig Fett oder Oel einzureiben, weil dies nach der Erfahrung die Ablösung des gebildeten Ueberzugs erleichtert. Ist er kein Electricitätsleiter, so muß seine Oberfläche erst leitend gemacht werden; es geschieht dies dadurch, daß man sie mit feinem Graphit- oder Bronzepulver überpinselt. Die Nachbildung ist natürlich in dem Falle, wo der Gegenstand selbst angewandt wird, vertieft, wenn letzterer erhaben ist, und umgekehrt. Wird dann noch eine Nachbildung von der Nachbildung gemacht, so ist diese zweite Nachbildung ganz dem Originale entsprechend. Diesen Zweck kann man einfacher dadurch erreichen, daß man von dem Gegenstande gleich von vornherein einen Abdruck in einer geschmolzenen leichtflüssigen Metallegirung, oder auch in Wachs oder Stearin macht, und diesen Abdruck in die Kette bringt. Daß ein Wachs- oder Stearinabdruck wieder erst leitend gemacht werden muß durch Ueberpinselung mit Graphit oder Bronze, braucht wohl nicht erst erwähnt zu werden. Auch Gutta Percha eignet sich nach Versuchen Böttger's sehr gut zu solchen Abdrücken. Ist der abzubildende Gegenstand eine Statuette, so macht man zuerst eine Gypsform, gießt diese mit Wachs aus, dann wird die Gypsform wieder abgenommen, und der Wachskern leitend gemacht, um in die Kette eingesetzt zu werden. Technisch wird die Galvanoplastik gegenwärtig im Großen hauptsächlich zur Vervielfältigung gestochener Kupferplatten und der Holzschnitte angewandt. Bei beiden nämlich ist die Anzahl der durch sie zu erzielenden Abdrücke immer wegen der Weichheit des Materials nur eine beschränkte, und die späteren stehen den früheren an Schärfe nach. Die Galvanoplastik aber hat ein Mittel an die Hand gegeben, von der Originalplatte eine beliebige Anzahl von Copien anzufertigen, welche der Originalplatte ganz vollkommen gleich sind, und von denen jede eine gleich große Anzahl Abdrücke liefert, wie das Original. Von einer galvanoplastischen Nachbildung von Statuen in großem Maßstab wird das seiner Vollendung entgegengehende großartige Guttenbergsmonument zu Frankfurt das erste Beispiel liefern.

Mit der Galvanoplastik nahe verwandt ist die von Kobell in München erfundene Galvanographie, d. i. die Kunst, in Tuschmanier gemalte Bilder durch Galvanoplastik zu vervielfältigen. Zu dem Ende wird das Bild von dem Maler mit einer eigenen Farbe auf eine silberplattirte Kupferplatte gemalt, und zwar so, daß die hellsten Lichter frei bleiben, die Farbe aber um so dicker aufgetragen wird, je dunkler der Schatten sein soll. Dann wird das Bild dadurch leitend gemacht, daß es mit feinem Graphitpulver überpinselt wird, und so in einen galvanoplastischen Apparat eingesetzt. Man erhält dann durch die galvanoplastische Nachbildung gleichsam eine gestochene Kupferplatte, in welcher, wie bei den gestochenen Platten, die den stärksten Schatten entsprechenden Stellen am meisten vertieft sind. Die Abdrücke werden von dieser Platte auf die gewöhnliche Weise gemacht.

Digitized by Google

Hier muß auch noch die durch Osann erfundene Galvanokaustik erwähnt werden, d. h. die Kunst, Metallplatten auf galvanischem Wege zu ätzen. Sie beruht darauf, daß, wenn man in eine Kupfervitriollösung, welche durch den galvanischen Strom zersetzt wird, metallisches Kupfer bringt, der Sauerstoff von dem zersetzten Wasser an das Kupfer tritt, und mit ihm Kupferoxyd bildet, welches sich mit der freigewordenen Schwefelsäure verbindet, und mit ihr Kupfervitriol bildet, der in dem vorhandenen Wasser sich löst. Man hängt nun bei der Galvanokaustik die zu ätzende Kupferplatte in die Vitriollösung, nachdem man vorher diejenigen Stellen, welche nicht angegriffen werden sollen, mit einem Ueberzug bedeckt hat. Wenn dann der Strom wirkt, so wird natürlich nur Kupfer an den nicht bedeckten Stellen aufgelöst. Hat die Aetzung tief genug stattgefunden, so wird die Platte herausgenommen, gereinigt, und zum Abdrucken benutzt.

Auf der Reducirung der Metalle aus ihren Salzen durch Einwirkung des galvanischen Stroms beruht auch die galvanische Vergoldung, Versilberung, Verzinkung u. s. w. Der Gegenstand, der einen Ueberzug von einem dieser Metalle erhalten soll, wird, nachdem man ihn sorgfältig gereinigt hat, an der Kathode einer aus mehreren Elementen bestehendrn constanten Kette befestigt, während die beiden Electroden in die geeignete Flüssigkeit eintauchen. Als Flüssigkeit wendet man bei der Vergoldung gewöhnlich eine Lösung von Chlorgold in wässerigem Cyankalium an, bei dem Verplatiniren und Versilbern vertauscht man das Chlorgold mit Chlorplatin und Chlorsilber, beim Verzinken kann es eine einfache Lösung des Zinkchlorids in Wasser sein. Namentlich die galvanische Vergoldung hat bereits eine weite Verbreitung gefunden, da sie vor der Feuervergoldung viele Vortheile voraus hat, wie z. B. die leichtere und schnellere Darstellbarkeit, die Vermeidung der der Gesundheit schädlichen Quecksilberdämpfe, die Möglichkeit dünnere und doch vollkommen schöne Goldüberzüge zu erzielen, und dadurch größere Billigkeit. Auch dürfte die galvanische Vergoldung bei gleicher Stärke des Ueberzugs wie bei der Feuervergoldung mit dieser auch gleiche Dauer haben.

§. 91. **Fortsetzung; theoretische Ansicht der Electrolyse.** Beobachtet man eine Electrolyse genauer, so findet man, daß die Jonen nur an den Electroden auftreten, und daß man in der übrigen Masse des Electrolyten keine Veränderung und keine Bewegung ausgeschiedener Jonen nach den Polen zu wahrnimmt. Mit Rücksicht hierauf macht man sich nach einer zuerst von Grotthuß aufgestellten und jetzt fast allgemein angenommenen Ansicht folgende theoretische Vorstellung über den Hergang bei einer Electrolyse. Indem die Atome zweier verschiedenen, eine Verbindung eingehen wollenden Stoffe in Berührung treten, erregen sie sich durch diesen Contakt gegenseitig electrisch. Da nun beide entgegengesetzt electrisch sind, so ziehen sie sich einander an und gehen dadurch die Verbindung ein. Durch die Verbindung haben sich aber die beiden entgegengesetzten Electricitäten neutralisirt, und jedes gebildete Molecül des zusammengesetzten Körpers ist demnach in einem unelectrischen Zustande. Wenn sich nun der zusammengesetzte Körper als Electrolyt zwischen den Polen einer galvanischen Batterie befindet, so werden durch Einwirkung der Electricität der Batterie alle Molecüle desselben wieder polarisch. Die electronegativen Bestandtheile der Molecüle wenden sich natürlich nach der Anode, die electropositiven nach

Digitized by Google

der Kathode. Ist nun die Anziehung zwischen der Anode und dem electronegativen Bestandtheil des daran liegenden Molecüls groß genug, so wird dieser Bestandtheil dem Molecül entrissen. Der andere electropositive Bestandtheil dieses Molecüls zieht nun den electronegativen des zunächst daran stoßenden Molecüls an, und vereinigt sich mit diesem zu einem neuen Molecül des zusammengesetzten Körpers. Dadurch wird in dem zweiten Molecül der electropositive Bestandtheil frei, er wirkt demnach anziehend auf den electronegativen des dritten Molecüls, mit welchem er sich jetzt ebenfalls zu einem neuen Molecül des zusammengesetzten Körpers verbindet. So geht es nun fort bis zu dem äußersten, mit der Kathode in Berührung befindlichen Molecül, welchem ebenfalls sein electronegativer Bestandtheil durch das vorhergehende Molecül entzogen, und sein electropositiver von der Kathode angezogen wird. An der Anode ist also jetzt der electronegative Bestandtheil des ersten, und an der Kathode der electropositive des letzten Molecüls frei. Nun müssen folgende Fälle unterschieden werden: 1) diese frei gewordenen Bestandtheile der beiden äußersten Molecüle finden an den Electroden keinen Stoff, mit welchem sie eine chemische Verbindung eingehen können, dann werden sie ausgeschieden; oder 2) sie finden einen solchen Stoff, dann gehen sie mit demselben eine Verbindung ein. Jetzt fragt es sich aber wieder, ob diese neue Verbindung in der umgebenden Substanz löslich ist oder nicht. Ist sie nicht löslich, so wird sie ausgeschieden; ist sie aber löslich, so wird sie sofort gelöst, und die Electrolyse erstreckt sich nun auch auf das neue Medium.

Nach dieser eben mitgetheilten Ansicht hält man also den electrischen Gegensatz zwischen 2 Körpern für gleichbedeutend mit chemischer Verwandtschaft. Von der Annahme ausgehend, daß durch die Berührung zweier heterogener Körper die Theilchen des einen stets electronegativ, und diejenigen des andern electropositiv erregt werden, hat Berzelius sämmtliche einfache Stoffe so in eine Reihe geordnet, daß jeder vorangehende gegen jeden nachfolgenden electronegativ ist, daß also, wenn eine Verbindung von zweien durch den galvanischen Strom zerlegt wird, der in der Reihe vorangehende Bestandtheil an der Anode, der folgende an der Kathode ausgeschieden wird. Die Reihe beginnt mit dem Sauerstoff und endigt mit dem Kalium. Je weiter 2 Elemente in dieser Reihe aus einander stehen, desto größer ist auch die durch sie bewirkte electrische Spannung, und desto größer demnach auch ihr Bestreben, sich mit einander zu vereinigen, d. h. desto größer ist ihre chemische Verwandtschaft. Bemerkt muß freilich werden, daß für viele Elemente ihre Stelle in dieser Spannungsreihe nicht durch directe Versuche der Electrolyse bestimmt worden ist, sondern daß man sie aus ihrem übrigen chemischen Verhalten geschlossen hat.

Die ganze Lehre von der Einwirkung des galvanischen Stromes auf zusammengesetzte Körper führt den Namen Electrochemie.

§. 92. **Fortsetzung; electrolytisches Gesetz, Voltameter.** 1) Man leite einen galvanischen Strom durch einen Wasserzersetzungsapparat, so wird man während einer gegebenen Zeit eine bestimmte Gasmenge erhalten. 2) Schaltet man noch einen zweiten solchen Apparat in die Kette ein, so daß der Strom durch beide gehen muß, so wird in beiden in derselben Zeit gleich viel Wasser zersetzt oder in jedem der beiden Apparate gleich viel Gas erhalten, nur ist die Gasmenge jetzt geringer. Ganz ähnlich ver-

Digitized by Google

hält es ſich, wenn man 3 und mehr ſolcher Apparate einſchaltet, die Gasmenge iſt immer in allen einzelnen Apparaten gleich groß, wird aber deſto geringer, je mehr Apparate es ſind. Bei einer gewiſſen Anzahl von Apparaten findet gar keine Waſſerzerſetzung mehr ſtatt. 3) Theilt ſich der Polardraht, nachdem er zu einem Zerſetzungsapparat geführt hat, in 2 oder mehrere gleich dicke und gleich lange Theile von derſelben materiellen Beſchaffenheit, und man ſchaltet in jedem derſelben einen neuen Zerſetzungsapparat ein, ſo gibt jeder Theilſtrom dieſelbe Gasmenge, und die Summe der Gasmengen aller einzelnen Theilſtröme iſt in derſelben Zeit ebenſo groß, wie die Gasmenge des ungetheilten Stromes. 4) Leitet man einen electriſchen Strom durch Waſſer und nach ſeinem Austritt aus demſelben noch durch einen anderen Electrolyten, z. B. Chlorſilber, ſo findet man, daß die durch gleichzeitige Zerlegung erhaltenen Mengen von Sauerſtoff, Waſſerſtoff, Chlor und Silber ſich verhalten, wie die Atomgewichte dieſer Stoffe, daß alſo von jedem derſelben in gleicher Zeit gleich viele Atome ausgeſchieden worden ſind.

Daß in dem zweiten Verſuche in jedem Zerſetzungsapparat ſich in derſelben Zeit gleich viel Gas anſammelt, iſt begreiflich, wenn man bedenkt, daß es ja ganz derſelbe Strom iſt, der in jedem einzelnen Apparate die Zerſetzung bewirkt; daß aber die Gasmenge geringer ausfällt, als in dem erſten Verſuche, erklärt ſich daraus, daß der Strom durch jeden neuen Zerſetzungsapparat, der in den Schließungsbogen eingeſchaltet wird, ein neues Hinderniß mehr zu überwinden hat, und demnach eine neue Schwächung erfährt. Im dritten Verſuch bringt erſt der ganze Strom im erſten Zerſetzungsapparat ſeine Wirkung hervor, dann aber wird er unter ganz gleichen Bedingungen in mehrere, unter einander gleiche Theilſtröme getheilt, und nun bringt jeder dieſer Theilſtröme auch eine gleiche Wirkung hervor. Daraus aber, daß die Summe der Wirkungen der Theilſtröme der Wirkung des Geſammtſtromes wieder gleich iſt, folgt offenbar, daß die Menge des zerſetzten Waſſers der im Strome thätigen Kraft proportional iſt. Berückſichtigen wir dabei noch den vierten Verſuch, der uns lehrt, daß durch denſelben Strom, d. h. durch dieſelbe Menge der in Bewegung begriffenen Electricität, von jedem Electrolyten gleich viele Atome ausgeſchieden werden (man nennt dies das Geſetz der feſten electrolytiſchen Action), ſo ſehen wir, daß wir aus der Menge der Zerſetzungsproducte auf die Menge der in einem electriſchen Strome wirkſamen Electricität zu ſchließen berechtigt ſind. Die Menge der durch einen Strom fortgeleiteten Electricität an und für ſich gibt uns noch keine Vorſtellung von der Stärke des Stromes; dieſe erhalten wir erſt dann, wenn wir neben der Menge auch noch die Zeit in Betracht ziehen, in welcher dieſe Menge durch den Strom in Bewegung geſetzt wird (deßhalb iſt bei den obigen Verſuchen ſtets auf die Zeit Rückſicht genommen). Wie wir nun kein anderes Mittel haben, über die Größe der uns unbekannten Naturkräfte zu urtheilen, als nach der Größe der von ihnen hervorgebrachten Wirkungen, ſo kann demnach auch die Menge des in einer beſtimmten Zeit durch Waſſerzerſetzung erhaltenen Gaſes als Maß der Stromſtärke, d. h. der in einer beſtimmten Zeit durch einen Querſchnitt der Kette ſtrömenden Electricitätsmenge, benutzt werden. Daß zu dieſem Behufe die Röhre oder die Röhren des Waſſerzerſetzungsapparats

Digitized by Google

graduirt sein müssen, damit man die Menge des entwickelten Gases dem Volumen nach messen könne, liegt in der Natur der Sache. Ein so eingerichteter Zersetzungsapparat heißt Volta-Electrometer oder auch kurzweg Voltameter. Gewöhnlich ist es ein mit angesäuertem Wasser oder mit Aetzkalilauge gefülltes und durch einen schweren bleiernen Deckel luftdicht geschlossenes gläsernes Gefäß. Durch den Deckel gehen, ebenfalls luftdicht, 2 isolirte Drähte, welche sich in 2 in die Flüssigkeit eintauchende Metallplatten endigen. Ist die Flüssigkeit angesäuertes Wasser, so müssen es Platinplatten sein, weil Platten von unedlen Metallen angegriffen würden; ist sie aber Aetzkalilösung, so können die Platten auch von Eisen sein. Durch den Deckel geht dann noch ein gebogenes Gasentbindungsrohr, durch welches die entwickelten Gase in eine graduirte Röhre geleitet werden können. Beim Gebrauche des Voltameters als Strommessers muß jedoch berücksichtigt werden, daß die Einschaltung dieses Instrumentes in den Schließungsbogen auf die Stromstärke einen großen Einfluß ausübt (es bietet dem Strome einen großen Widerstand zu überwinden), und daß man daher nach den Angaben des Voltameters noch keinen sicheren Schluß auf die Größe der Kraft machen kann, welche 2 galvanische Batterien an und für sich auszuüben vermögen, da, wenn 2 ungleiche Kräfte ein gleich großes Hinderniß zu bewältigen haben, von der kleineren ein viel bedeutenderer Theil aufgewandt werden muß, als von der größeren, wodurch natürlich ihr gegenseitiges Verhältniß zu einander nicht unverändert bleiben kann.

Ebenso wie in dem Schließungsbogen die Zersetzung eines Electrolyten stattfindet, ebenso muß auch die Flüssigkeit in den einzelnen Ketten, aus welchen die Batterie besteht, zersetzt werden, und zwar in jeder einzelnen Kette gleich viel derselben, weil es ja derselbe Strom ist, der durch sie alle circulirt. Der ausgeschiedene Sauerstoff tritt, wie schon bemerkt, an das Zink, und oxydirt dasselbe. Da aber eine gewisse Menge Sauerstoff auch nur eine ganz bestimmte Menge Zink oxydiren kann, die Menge des ausgeschiedenen Sauerstoffs aber von der Stärke des Stroms abhängt, so wird auch desto mehr Zink consumirt werden, je stärker der Strom ist. In der Regel findet man jedoch die Consumtion an Zink bedeutender, als sie nach dem Gesetz der festen electrolytischen Action sein dürfte. Es ist dies ein Zeichen, daß in den einzelnen Ketten noch eine andere chemische Einwirkung unabhängig von dem Strome stattfindet, und muß als eine Unvollkommenheit in der Construction der Ketten angesehen werden.

§. 93. **Galvanische Polarisation; Ladungssäule.** 1) Wenn ein Voltameter einige Zeit in dem Schließungsbogen einer galvanischen Kette oder Batterie gewesen ist, und man hebt die Verbindung mit der Kette auf, verbindet dagegen die Platten des Voltameters leitend mit einander, so geht durch den Schließungsdraht ein galvanischer Strom, der demjenigen entgegengesetzt ist, welcher durch das Voltameter ging, als es noch mit der Kette verbunden war. Die Richtung des Stromes kann sehr leicht durch den Multiplicator, welchen wir in einem der nächsten Paragraphen kennen lernen, ermittelt werden. Dieser secundäre Strom verschwindet jedoch bald wieder, kann aber stets von Neuem hervorgerufen werden, wenn man durch den Voltameter wieder einige Zeit den primären Strom der Kette leitet. 2) Wird eine Säule aus befeuchteten Tuchlappen und lauter Platten desselben Metalls aufgebaut, und werden ihre Pole mit den Polen

Digitized by Google

einer Volta'schen Säule leitend verbunden, wird aber nach einiger Zeit diese Verbindung aufgehoben, und nun die Säule für sich geschlossen, so zeigt sie sich ebenfalls geladen, indem durch sie ein Strom circulirt, der zu dem Strome der Volta'schen Säule, mit welcher sie verbunden war, eine entgegengesetzte Richtung hat. Solche Säulen nennt man nach ihrem Erfinder Ritter'sche oder auch Ladungssäulen oder secundäre Säulen. Der Strom einer Ladungssäule zeigt dieselben Wirkungen, wie eine gewöhnliche Volta'sche Säule, ist aber auch nur von kurzer Dauer. Poggendorff hat eine Vorrichtung, die Wippe, erdacht, durch welche ein beständiges Unterbrechen und Wiederherstellen der Verbindung des primären und secundären Stroms erzielt wird, und vermittelst deren die Wirkungen der Ritter'schen Säule so gesteigert werden können, daß sie diejenigen des primären Stroms übertreffen.

Untersuchen wir nun, auf welche Weise der secundäre Strom im ersten Versuche hervorgerufen werde, da sich doch eine Kette aus denselben Metallen und einer Flüssigkeit construirt für sich unwirksam erweist, so finden wir, daß die Ursache in den durch die Electrolyse ausgeschiedenen Gasen, die an den Platten des Voltameters verdichtet werden, zu suchen ist. Wir haben jetzt nicht mehr 2 Platinplatten, sondern gewissermaßen eine Platte Sauerstoff und eine Platte Wasserstoff. Diese werden nun selbst zu Electromotoren; da aber der electronegative Sauerstoff an dem positiven Pole und der electropositive Wasserstoff an dem negativen Pole ausgeschieden wurde, so muß die electromotorische Kraft dieser 2 Gasplatten der electromotorischen Kraft der ursprünglichen Kette entgegengesetzt sein, und demnach einen Strom in entgegengesetzter Richtung liefern. Daß der Strom nicht lange andauert, kommt daher, daß, wenn nicht fortwährend an den Platten neues Gas entwickelt, und dadurch die Condensation unterhalten wird, die Gase aus dem Zustande der Verdichtung herauskommen. Von den Platinplatten des Voltameters sagt man, sie seien durch die ausgeschiedenen Gase galvanisch polarisirt worden, und die ganze Erscheinung, daß die Platten eine dem ursprünglichen Strome entgegenwirkende Ladung erhalten, bezeichnet man mit dem Namen der galvanischen Polarisation. Da nun auch im Innern der geschlossenen Kette, wie wir gesehen haben, eine Electrolyse stattfindet, und hier bei den gewöhnlichen veränderlichen Ketten ebenfalls Wasser zerlegt, also Sauerstoff und Wasserstoff gasförmig ausgeschieden wird, so müssen auch die Platten der Kette selbst, nachdem diese einige Zeit geschlossen ist, galvanisch polarisirt werden; es muß demnach hierdurch ein Strom hervorgerufen werden, welcher dem ursprünglichen Strom entgegengesetzt ist, und ihn schwächt. Es erklärt sich hieraus die schnelle Abnahme der Wirkungen dieser Ketten. Sobald die Ursache dieser Abnahme erkannt war, wußte man also, worauf es ankam, um Ketten von constanter Wirkung zu construiren. Man mußte die Ausscheidung der freien Gase verhindern. Für den Sauerstoff war keine Vorsorge zu treffen, da dieser sich sofort mit dem Zinke zu Zinkoxyd verbindet; der Wasserstoff aber durfte nicht mehr gasförmig an der Kupferplatte auftreten. In der Daniell'schen Kette erreichte man diesen Zweck dadurch, daß durch den electrischen Strom nicht nur Wasser, sondern auch der Kupfervitriol zerlegt wird. Von dem Wasser der Wasserstoff, und von dem Kupfervitriol das Kupferoxyd begeben sich, wie wir bereits gesehen haben, nach der Kupfer-

Digitized by Google

platte, der Wasserstoff aber reducirt hier sofort das Kupferoxyd, indem er sich mit dem Sauerstoff desselben zu Wasser verbindet und metallisches Kupfer an der Kupferplatte ausgeschieden wird, wodurch natürlich die materielle Beschaffenheit der Oberfläche dieser Platte stets gleich erhalten wird. In der Grove'schen und Bunsen'schen Kette verbindet sich der ausgeschiedene Wasserstoff sofort mit einem Theile des Sauerstoffs der Salpetersäure wieder zu Wasser. Der Theil der Salpetersäure, welchem der Sauerstoff entzogen wurde, wird dadurch zu Stickoxydgas, das bei dem Entweichen aus der Salpetersäure sich durch Berührung mit der atmosphärischen Luft wieder höher zu salpetriger Säure oxydirt, wie sich an den aufsteigenden gelbrothen Dämpfen zeigen läßt.

Was nun die Ladungssäule betrifft, so erklärt sich ihre Wirksamkeit auf ganz ähnliche Art. Da sie aus lauter Electricitätsleitern zusammengesetzt ist, so geht, wenn sie in den Schließungsbogen einer Volta'schen Säule gebracht ist, der Strom durch sie hindurch. Der Strom zerlegt in jeder einfachen Kette derselben das Wasser der Flüssigkeit, dadurch wird an allen nach einer Richtung liegenden Platten der einzelnen Ketten Sauerstoff, und an allen nach der anderen Richtung liegenden Platten Wasserstoff verdichtet, so daß in der Säule immer eine Wasserstoffplatte der einen Kette mit der Sauerstoffplatte der nächsten Kette verbunden ist. Dadurch aber sind je zwei solcher Platten zu Electromotoren geworden. Die Wirkungen der Ladungssäulen müssen sich also von den Wirkungen des Voltameters in dem ersten Versuch grade so unterscheiden, wie die Wirkungen einer Volta'schen Säule von den Wirkungen einer einfachen galvanischen Kette.

§. 94. **Contacttheorie; chemische Theorie.** Da über das Wesen der electromotorischen Kraft die Ansichten noch verschieden sind, so müssen hier hauptsächlich diejenigen 2 Ansichten, welche sich Geltung zu verschaffen wußten, kurz erwähnt werden. Allgemein ist man darin einverstanden, daß die Veranlassung zum Hervortreten der galvanischen Electricität die Berührung heterogener Stoffe sei, allein man streitet noch darüber, ob diese Berührung auch die Ursache der Electricitätsentwicklung sei, oder ob durch sie erst ein chemischer Proceß eingeleitet werde, der als eigentlicher Erzeuger der Electricität angesehen werden müsse. Die erstere Ansicht nennt man die Contacttheorie, die letztere die chemische Theorie. Die Contacttheorie wurde zuerst von Volta aufgestellt, der die Berührung verschiedenartiger Metalle als die einzige Quelle der galvanischen Electricität betrachtet. Nach ihm sind die Flüssigkeiten in der Kette nur als Leiter der Electricität anzusehen und nicht zugleich auch als Electromotoren. Da dies indeß, wie wir gesehen haben, unrichtig ist, so ist man auch von der Ansicht Volta's abgegangen, und hat die Contacttheorie nach dem Stande der erweiterten Kenntnisse über galvanische Electricität modificirt; es ist dies namentlich durch Pfaff, Fechner und Poggendorff geschehen. Nach ihnen wird die Electricität durch eine den Metallen innewohnende und in denselben durch gegenseitige Berührung erregte Kraft hervorgerufen, ohne daß die Metalle dabei irgend eine Veränderung in ihrer Materie erleiden. Beide Metalle werden als während der Berührung fortdauernd thätig betrachtet, die Flüssigkeit dagegen theils als passiv, indem sie die von den Metallen erregte Electricität fortleitet, theils aber auch als thätig, insofern sie in Berührung mit den Metallen ebenfalls Electricität erregt.

Digitized by Google

Die Wiedervereinigung der durch die Berührung von einander getrennten entgegengesetzten Electricitäten wird nach dieser Ansicht durch die fortdauernd wirksame electromotorische Kraft verhindert. Dieser Ansicht gegenüber steht die hauptsächlich von de la Rive, Becquerel und Faraday vertheidigte chemische Theorie, nach welcher die Electricitätsentwicklung erst die Folge einer vorhergegangenen chemischen Wirkung ist, welche die Flüssigkeit der Kette auf das eine Metall ausübt. Es wird daher nur diejenige Electricität frei, welche in der Flüssigkeit gebunden war, weil die chemische Vereinigung ihrer Bestandtheile aufhört. Der Wiedervereinigung der beiden freigewordenen entgegengesetzten Electricitäten stehen nach der chemischen Theorie nur gewöhnliche Leitungswiderstände entgegen, und die chemische Wirkung ersetzt fortwährend diejenige Menge freier Electricität, welche durch Ausgleichung der entgegengesetzten Electricitäten verloren geht. Es kann also ohne die chemische Zersetzung eines Electrolyten gar keine Electricität in der Kette auftreten.

Daß der Strom nicht ohne Zersetzung der Flüssigkeit circuliren kann, ist anerkannt. Der Streit dreht sich also darum, ob die Zersetzung auch die Ursache des electrischen Stromes sei, oder ob der chemischen Zersetzung in der Kette erst ein electrischer Spannungszustand vorangehe. Da die chemische Theorie den Volta'schen Fundamentalversuch entweder gänzlich ignorirt, oder gezwungen ist, zur Erklärung desselben ihre Zuflucht zu hypothetischen, nicht nachweisbaren chemischen Einflüssen der Luft zu nehmen, da man ferner galvanische Ketten construiren kann, bei welchen vor der Schließung auch nicht eine Spur chemischer Zersetzung stattfindet, und die dennoch in dem Momente, in welchem sie geschlossen werden, einen Strom liefern *), so neigt sich die größere Anzahl der Physiker auf die Seite der Contacttheorie. Der ganze Streit ist indessen ohne alle Erheblichkeit, und ändert an der Sache durchaus Nichts.

§. 95. Magnetische Wirkungen der galvanischen Kette und Batterie; Oersted's Fundamentalversuch. Im Jahre 1820 machte Oersted die Entdeckung, daß, wenn man dem Schließungsdraht einer galvanischen Kette oder Batterie, während ein Strom durch denselben circulirt, eine frei aufgehängte Magnetnadel nähert, diese abgelenkt wird. Bald zeigte es sich, daß diese Ablenkung nicht immer in einerlei Weise stattfand. Bei näherer Untersuchung ließen sich folgende Fälle unterscheiden: 1) Wenn der Strom in dem Schließungsdrahte, der aus einem nicht magnetischen Metalle besteht, die Richtung von Süd nach Nord hat, und die Magnetnadel befindet sich parallel dem Drahte über demselben, so wird der Nordpol der Nadel nach Osten abgelenkt. 2) Befindet sich aber die Magnetnadel unter dem Drahte, so wird der Nordpol nach Westen abgelenkt. 3) Steht die Nadel in gleicher Höhe neben dem Drahte an der Ostseite, so senkt sich der Nordpol. 4) Ist aber die Nadel auf der Westseite, so hebt sich der Nordpol. 5) Geht der Strom im Drahte von Nord nach Süd, so sind in jedem einzelnen Falle die Ablenkungen des Nordpols gerade die entgegengesetzten. 6) Ist die Richtung des Stromes nicht mehr der Nadel parallel, wie bisher angenommen wurde, sondern bildet mit der-

*) Eine Auflösung von vollkommen neutralem schwefelsaurem Zink greift z. B. Zink nicht an, dessenungeachtet gibt eine Combination von Zink und Kupfer in einer Auflösung des neutralen schwefelsauren Zinks einen Strom.

Digitized by Google

ſelben einen ſpitzen Winkel, ſo erfolgen die Ablenkungen in demſelben Sinne, nur ſchwächer. 7) Auch wenn der Strom durch einen vertical gerichteten Draht geht, wirkt er ablenkend auf eine in ſeiner Nähe befindliche Magnetnadel ein; die Ablenkungen erfolgen auch hier in gerade entgegengeſetzten Richtungen, je nachdem der Strom den Draht von Unten nach Oben, oder von Oben nach Unten durchläuft.

Alle dieſe verſchiedenartigen Ablenkungen laſſen ſich für jeden einzelnen Fall mit Leichtigkeit nach der von Ampere zuerſt aufgeſtellten Regel im Voraus beſtimmen. Dieſe Regel heißt: Man denke ſich in dem Strome einen Schwimmer, deſſen Geſicht der Nadel zugekehrt iſt, und der mit dem Strome ſchwimmt, d. h. ſo daß der Strom von ſeinen Füßen nach dem Kopfe geht, dann wird der Nordpol der Nadel ſtets nach der linken Hand des Schwimmers abgelenkt.

Je nachdem man zu den angeführten Verſuchen einen ſchwächeren oder ſtärkeren Strom anwendet, je nachdem iſt die bewirkte Ablenkung geringer oder größer; ihr größter Werth iſt jedoch der, daß die Richtung des Stromes mit der Nadel, nachdem ſie zur Ruhe gekommen iſt, einen rechten Winkel macht. Wir ſchließen demnach daraus, daß der Strom der Magnetnadel eine zu ſeiner Richtung ſenkrechte Lage zu geben ſtrebt. Daß die Nadel bei ſchwächeren Strömen dieſe ſenkrechte Lage nicht annimmt, kann nur daraus erklärt werden, daß ſie zugleich auch noch unter der Einwirkung des Erdmagnetismus ſteht, welche der Ablenkung durch den Strom entgegenwirkt. Die Richtigkeit dieſer Erklärung kann man dadurch prüfen, daß man die Einwirkung des Erdmagnetismus aufhebt, d. h. dadurch, daß man ſtatt einer gewöhnlichen Magnetnadel eine aſtatiſche Nadel anwendet. Man wird finden, daß auch ſchwache Ströme eine ſolche Nadel ſenkrecht zu ſich richten. Eine andere Beſtätigung erhält man noch durch folgenden Verſuch. Man laſſe den Strom von Weſt nach Oſt oder von Oſt nach Weſt durch den Draht gehen, doch ſo, daß der Nordpol der Nadel ſich bereits zur Linken des gedachten Schwimmers befindet, ſo wird die Nadel nicht abgelenkt, ſie zeigt im Gegentheil jetzt ein noch größeres Beſtreben, in ihrer Gleichgewichtslage zu beharren, als früher, was daraus erſichtlich wird, daß ſie, aus dieſer Lage herausgebracht, jetzt ſchnellere Schwingungen macht, um in dieſelbe zurückzukehren.

Oerſted's Entdeckung führte ſchnell zu einer ganzen Reihe anderer Entdeckungen, durch welche die Phyſik mit einem neuen Abſchnitte, dem Electromagnetismus, bereichert wurde, deſſen Grundzüge in den folgenden Paragraphen enthalten ſind.

§. 96. **Fortſetzung; Multiplicator, Tangentenbouſſole.** Schon im vorigen Paragraph wurde bemerkt, daß die Ablenkung der Magnetnadel bei Anwendung ſtärkerer Ströme größer ſei, als bei Anwendung ſchwächerer Ströme. Man mußte daher bald auf den Gedanken kommen, dieſe Ablenkung zur Auffindung und Beurtheilung galvaniſcher Ströme zu benutzen. Es iſt dies auch kurz nach Oerſted's Entdeckung durch Schweigger geſchehen, der ein Inſtrument, den Multiplicator (multiplicare, vervielfältigen) oder Galvanometr (Meſſer galvaniſcher Ströme) conſtruirte, welches bis jetzt als das feinſte aller Electroſcope angeſehen werden muß. Um die Wirkſamkeit dieſes Inſtrumentes zu verſtehen, denke man

Digitized by Google

sich zunächst um eine frei bewegliche Magnetnadel den Schließungsdraht in Form eines Rechtecks gebogen. In jeder Seite des Rechtecks hat der Strom eine andere Richtung, aber auch zur Nadel eine andere Lage. Wendet man auf den Strom in jeder Seite des Rechtecks die Ampere'sche Regel an, so findet man, daß derselbe überall in demselben Sinne auf die Nadel einwirkt. Die Gesammtwirkung auf die Nadel muß demnach durch diese Vorrichtung bedeutend verstärkt werden. Eine weitere Erfahrung hatte gelehrt, daß, wenn man die Magnetnadel über verschiedene Stellen desselben Schließungsdrahtes in gleichem Abstande von demselben aufhängt, die Ablenkung der Nadel bei unveränderter Stärke des Stroms sich gleichbleibt, daß also in einem Schließungsdraht die Kraft des electrischen Stromes an allen Stellen die nämliche ist. Dadurch veranlaßt führte Schweigger seinen Schließungsdraht nicht in einfacher, sondern in vielfacher Windung um die Nadel, da ja jede einzelne Windung eine gleich große Einwirkung auf die Nadel ausüben mußte. Dies war auch der Grund, warum er seinem Instrumente den Namen Multiplicator beilegte. Damit der Strom sich nicht seitwärts von einer Windung zur anderen fortpflanze, sondern den Draht seiner ganzen Länge nach durchlaufe, müssen die einzelnen Windungen von einander isolirt werden, welches dadurch geschieht, daß man mit Seide übersponnenen Kupferdraht anwendet. Der Draht wird auf einen rechtwinkligen Rahmen von Holz oder Metall aufgewickelt, doch so, daß seine beiden Enden frei bleiben, um sie mit den Polen der galvanischen Kette verbinden zu können. Die Nadel hängt, um ihr eine größere Beweglichkeit zu geben, an einem Coconfaden. Ferner ist ein getheilter Kreis angebracht, dessen Mittelpunkt in derselben auf der Kreisebene senkrechten Linie liegen muß, auf welcher auch der Punkt sich befindet, um welchen die Nadel schwingt. Der Kreis dient dazu, die Größe der Ablenkung zu messen. Das Ganze wird durch eine Glasglocke vor dem Luftzuge geschützt. Da die Ablenkung nach dem vorigen Paragraph am bedeutendsten wird, wenn der Strom parallel der Nadel geht, so ergibt sich daraus, daß man bei anzustellenden Versuchen den Rahmen erst so zu richten hat, daß die Ebene der Drahtwindungen mit dem magnetischen Meridian zusammenfällt. Eine wesentliche Verbesserung und einen noch bedeutend höheren Grad von Empfindlichkeit hat Schweigger's Multiplicator durch Nobili erhalten, der statt einer einfachen Magnetnadel eine astatische Doppelnadel anwandte. Dadurch wurde die Magnetnadel dem Einfluß des Erdmagnetismus entzogen, und der Strom kann demnach ungehindert auf dieselbe einwirken. Daß man den Nadeln des Multiplicators so wenig Masse als möglich gibt, liegt in der Natur der Sache, da sie offenbar desto beweglicher sein müssen, je geringer ihre Masse ist. So ist man dahin gelangt, Multiplicatoren zu construiren, durch deren Anwendung die Anwesenheit der schwächsten Ströme nachgewiesen werden kann. Zugleich lehrt uns die Ampere'sche Regel, wie der Multiplicator zu benutzen sei, um auch auf eine leichte Weise die Richtung eines Stromes zu ermitteln. So schätzbar und unentbehrlich dem Physiker auch dieses Instrument ist, so führt es doch den Namen Galvanometer mit Unrecht, da es nicht angewandt werden kann, um die Stärke zweier verschiedenen galvanischen Ströme numerisch mit einander zu vergleichen. In dieser Hinsicht leidet es an demselben Fehler, der oben im §. 92 von dem Volta-

Digitized by Google

meter nachgewiesen wurde, denn auch durch die Länge des Multiplicatordrahtes wird, wie später gezeigt werden soll, dem Strom ein bedeutendes Hinderniß dargeboten, zu dessen Bewältigung ein stärkerer Strom einen verhältnißmäßig geringeren Verlust erleidet, als ein schwächerer Strom.

Während der Multiplicator wegen seiner außerordentlichen Empfindlichkeit nur für schwache Ströme seine Anwendung findet, hat man ein anderes Instrument, die Tangentenbousſole, construirt, bei welchem die durch den galvanischen Strom bewirkte Ablenkung einer Magnetnadel ebenfalls benutzt wird, um stärkere Ströme mit einander zu vergleichen, und gegen einander abzumessen. Weil man es eben mit stärkeren Strömen zu thun hat, ist die Vervielfältigung der Einwirkung des Stromes durch den Multiplicatordraht nicht erforderlich, sondern eine einfache Windung genügt. Ebenso bedarf man keiner astatischen, sondern nur einer einfachen Nadel, deren Masse im Vergleich zu derjenigen der Multiplicatornadeln selbst ziemlich bedeutend sein kann. Demnach besteht die Tangentenbousſole aus einem kreisförmig gebogenen Kupferstreifen, dessen Durchmesser in der Regel mehr als 1 Fuß beträgt, und dessen Enden in der Peripherie des Kreises an einander grenzen, und daselbst durch eine isolirende Zwischenlage von einander getrennt sind. In der Mitte des Streifens befindet sich eine Bousſole, deren Nadel wenigstens 12mal kleiner ist, als der Durchmesser des Kupferstreifens. Der Mittelpunkt des Streifens ist zugleich der Drehungspunkt der Nadel. Bei einem anzustellenden Versuche wird wieder die Ebene des Streifens zuerst in den magnetischen Meridian gebracht, so daß auch die Nadel in diese Ebene hineinfällt. Den Namen Tangentenbousſole hat das Instrument erhalten, weil nachgewiesen werden kann, daß sich die Stärken zweier verschiedenen Ströme verhalten wie die Tangenten der durch sie bewirkten Ablenkungswinkel.

Fig. 14.

Es sei nämlich AB (Fig. 14) der magnetische Meridian, CD die Lage der Nadel, nachdem sie durch den Strom abgelenkt worden ist, α also der Ablenkungswinkel. Die Bewegung der Nadel nach CD ist hervorgebracht durch die gleichzeitige Einwirkung zweier Kräfte, des Erdmagnetismus und der Kraft des Stromes. Setzen wir statt dieser 2 Kräfte ihre Resultirende, so muß diese offenbar in der Richtung DC wirksam gedacht werden, ihre Größe sei ausgedrückt durch CE. Denken wir uns CE wieder in die 2 ursprünglichen Kräfte zerlegt, so muß die eine, der Erdmagnetismus, weil sie die Nadel in den magnetischen Meridian zurückzuführen strebt, die Richtung CF || AB haben, die andere dagegen, die Kraft des Stromes, muß die Richtung CG ⊥ AB erhalten, weil sie die Nadel senkrecht zu dem magnetischen Meridian zu stellen sucht. Aus dem Kräfteparallelogramm ergibt sich also, daß in unserem Falle CF Richtung und Größe der erdmagnetischen Kraft, CG Richtung und Größe der Kraft des Stromes vorstellt. Nun ist $\sphericalangle ECF = \sphericalangle \alpha$, und $\frac{EF}{CF} = \text{tang. } \alpha$, also auch $\frac{CG}{CF} = \text{tang. } \alpha$ und $CG = CF \times \text{tang. } \alpha$

Digitized by Google

Da nun an demselben Orte der Erdmagnetismus auf dieselbe Nadel stets gleich stark einwirkt, so ist demnach CF eine constante Größe, und der Werth von CG oder die Stärke des Stromes hängt nur von tang. α ab; das Product CF $\times$ tang. α wird n mal größer, wenn tang. α n mal größer wird, und da dieses Product $=$ CG oder der Stärke des Stromes ist, so verhalten sich also die Stromstärken, wie die Tangenten der Ablenkungswinkel.

§. 97. Fortsetzung; Rotationen von Magneten unter dem Einfluß des galvanischen Stroms. 1) Wenn ein Magnetstab bei verticaler Stellung seiner Axe sich frei in dieser Stellung bewegen kann, und man führt in dessen Nähe einen ebenfalls vertical gerichteten Strom vorbei, doch so, daß der Strom sich nur an der einen Hälfte des Magnetstabs hinbewegt, so rotirt der Magnet um den Draht, durch welchen der Strom circulirt, ohne aus der verticalen Lage zu kommen. Es gibt verschiedene Vorrichtungen, um diesen Versuch anzustellen, deren nähere Beschreibung uns jedoch hier zu weit führen würde. Die Richtung, in welcher der Magnetstab rotirt, hängt eines Theils davon ab, an welcher Hälfte des Magnetstabs der Strom vorbeigeht, anderen Theils aber auch von der Richtung, in welcher der Strom circulirt. Ist z. B. der Strom von Unten nach Oben gerichtet, und geht an derjenigen Hälfte des Magnetstabs vorbei, welche sich in dem Nordpole desselben endigt, so rotirt der Stab in der Richtung, welche die Zeiger einer Uhr haben. Wird der Strom umgekehrt, sonst aber Nichts geändert, so rotirt der Stab in entgegengesetzter Richtung. Dasselbe findet statt, wenn man den Strom ungeändert läßt, ihn aber an derjenigen Hälfte vorbeiführt, welche in dem Südpol endigt. Die erste Rotation dagegen erhält man auch, wenn der Strom von Oben nach Unten und an derjenigen Hälfte vorbeigeht, welche in dem Südpole endigt, wenn also im Vergleich zu dem ersten Fall sowohl die Richtung des Stromes, als auch zu gleicher Zeit die Hälfte des Magnetstabes vertauscht wird. 2) Kann sich ein cylindrischer verticaler Magnetstab frei um seine Längenare drehen, und man benutzt die eine Hälfte des Magnetstabes selbst als Leitung für den Strom, d. h. daß der Strom an dem einen Pole eintritt, und in der Mitte den Magnet wieder verläßt, oder umgekehrt, so rotirt der Stab um seine eigene Axe. Auch hier hängt die Richtung der Rotation sowohl von der Richtung des Stromes, als auch zu gleicher Zeit davon ab, durch welche Hälfte des Magnetstabs er geht; sie erfolgt unter denselben Bedingungen ganz so, wie in 1.

Untersucht man die verschiedenen Rotationsrichtungen in diesen beiden Versuchen genauer, so findet man, daß sie in allen Fällen ebenfalls der von Ampère aufgestellten Regel entsprechen. Schon hieraus läßt sich schließen, daß wir es hier ganz mit derselben Wirkungsweise des Stromes zu thun haben, wie bei dem Oersted'schen Fundamentalversuch. Der Hauptunterschied zwischen diesen Versuchen und dem Oersted'schen besteht darin, daß hier der electrische Strom vorzugsweise nur auf den einen Pol des Magnets einwirkt, während bei dem Oersted'schen Versuche die Einwirkung auf beide Pole auf gleiche Weise erfolgt. Dem fortdauernden und sich gleich bleibenden Bestreben des Stroms, den Pol, auf welchen er einwirkt, nach einer bestimmten Seite hin abzulenken, kann aber nicht anders genügt werden, als wenn der Magnet um den Strom rotirt. Bei

Digitized by Google

dem Oerstedʼschen Versuche dagegen kann keine Rotation eintreten, weil sich hier beide Pole zu gleicher Zeit grade nach entgegengesetzten Richtungen zu drehen streben, diesem Bestreben aber nicht genügen können, da sie ja unveränderlich mit einander verbunden sind. So lange die Nadel dem Strome parallel ist, ist die Einwirkung der verschiedenen Stromtheile auf die beiden Pole wegen der ungleichen Entfernung von denselben, nicht gleich, die Nadel wird daher wirklich bewegt. Sowie aber die Nadel sich senkrecht zu dem Strome gestellt hat, muß die fernere Bewegung aufhören, weil jetzt alle Stromtheile wegen der gleichen Entfernung von den beiden Polen auf dieselben gleich stark einwirken.

§. 98. **Fortsetzung; Einwirkung eines festen Magnets auf einen beweglichen Strom.** 1) Ist ein Theil des Schließungsdrahtes um eine verticale Axe beweglich, und nähert man ihm, während der Strom durch ihn hindurchgeht, den Pol eines Magnets, so findet man, daß der Draht angezogen oder abgestoßen wird, je nachdem der Nordpol oder Südpol genähert wurde und je nach der Richtung des Stromes. 2) Läßt man einen leicht beweglichen Draht auf eine Quecksilberfläche herabhängen, welche den einen Pol eines festen Magnetstabs umgibt, und leitet man einen electrischen Strom durch den Draht und das Quecksilber, so rotirt der Draht um den Magnetpol. Auch hier hängt die Richtung der Rotation sowohl von der Richtung des Stromes ab, als auch davon, um welchen Magnetpol die Rotation erfolgt. Um zu zeigen, daß unter sonst gleichen Umständen die beiden Pole entgegengesetzte Rotationen hervorrufen, hat man einen Apparat construirt, bei welchem auf den beiden Polen eines vertical stehenden Hufeisenmagnets um die Pole bewegliche einfache Ketten angebracht sind. 3) An einem gabelförmigen Drahte ist ein kupfernes sternförmiges Rädchen angebracht, so daß es sich zwischen den beiden Schenkeln des Drahts um eine horizontale Axe bewegen kann. Die Ebene des Rädchens befindet sich zwischen den Schenkeln eines hufeisenförmigen Magnets, und die unteren Spitzen desselben reichen in Quecksilber. Das Quecksilber wird mit dem einen Pole, der gabelförmige Draht mit dem anderen Pole einer Säule verbunden. Sobald die Säule geschlossen ist, und der Strom anfängt zu circuliren, beginnt das Rädchen sich rasch um seine Axe zu drehen. Legt man den Magnet um, so daß der Nordpol dahin kommt, wo der Südpol war, oder ändert man die Richtung des Stroms, so dreht sich das Rädchen nach der entgegengesetzten Richtung. Der Apparat heißt nach seinem Erfinder Barlowʼs Rad.

Durch diese Versuche wird im Allgemeinen bestätigt, was wohl im Voraus zu vermuthen stand, daß die Einwirkung zwischen einem Strome und einem Magnete eine gegenseitige sei. Untersuchen wir in dem ersten Versuche näher, in welchem Falle Anziehung und in welchem Abstoßung stattfindet, so ergibt sich, daß der Leiter von dem Magnete angezogen wird, wenn der Strom von Unten nach Oben geht, und, von der Drehungsaxe angesehen, den genäherten Nordpol zur Rechten hat. Wird von diesen Bedingungen eine abgeändert dadurch, daß entweder der Strom von Oben nach Unten geht, oder daß der Nordpol zur Linken des Stroms ist, oder daß der Südpol statt des Nordpols genähert wird, so erfolgt Abstoßung. In dem zweiten Versuch erfolgt die Rotation in der Richtung, in welcher sich die Zeiger einer Uhr bewegen, wenn der Strom von dem Quecksilber

Digitized by Google

zu dem Drahte geht, und das Queckſilber den Nordpol des Magnets umgibt. Wird hier eine dieſer beiden Bedingungen geändert, ſo rotirt der Draht in der entgegengeſetzten Richtung; werden ſie aber beide zugleich geändert, ſo bleibt die Richtung ungeändert. Vergleichen wir dieſe Reſultate mit denen in §. 95 und §. 97, und ſuchen nach der Ampère'ſchen Regel, wie ſich in unſeren Fällen der Magnet hätte bewegen müſſen, wenn er beweglich, der Strom aber feſt wäre, ſo zeigt ſich, daß der Strom ſich jedes Mal nach der entgegengeſetzten Richtung bewegt, als nach welcher der Magnet ſich bewegt haben würde. Daſſelbe findet ſtatt bei Barlow's Rädchen, denn, wenn bei demſelben der Strom von dem Queckſilber zu dem Rädchen geht, ſo rotirt es in ſeinem unteren Theile, von dem Nordpol des Magnets angeſehen, von Rechts nach Links. Hier unterliegt der Strom freilich der gleichzeitigen Einwirkung beider Pole, aber man muß bedenken, daß die beiden entgegengeſetzten Pole auch zu gleicher Zeit eine entgegengeſetzte Lage zu dem Strome haben, wodurch erklärlich wird, daß die Wirkſamkeit des einen Pols nicht durch die des anderen aufgehoben, ſondern im Gegentheil die Geſammtwirkung vergrößert wird.

§. 99. **Fortſetzung; ein von einem Strome durchſtrömter Leiter verhält ſich einem Magnete ähnlich.** 1) Wenn durch einen Schließungsdraht ein ziemlich ſtarker Strom circulirt, ſo zieht derſelbe Eiſenfeilſpäne an. Sobald der Strom unterbrochen wird, fallen dieſelben jedoch wieder ab. 2) Ein um eine verticale Are leicht beweglicher Theil eines Schließungsdrahtes, der entweder kreisförmig oder rechteckig umgebogen iſt, ſtellt ſich von ſelbſt von Oſten nach Weſten ein. Wird der Strom in dem Schließungsdrahte umgekehrt, ſo macht der bewegliche Draht eine halbe Umdrehung, und kommt wieder zur Ruhe, wenn die Ebene deſſelben mit der Ebene des magnetiſchen Meridians einen rechten Winkel bildet, wenn er alſo wieder von Weſten nach Oſten gerichtet iſt *). 3) Wird aber der Draht ſo gebogen, daß er zu beiden Seiten der Umdrehungsare ſymmetriſch iſt, und daß dabei immer die entſprechenden Theile deſſelben von dem Strome in der nämlichen Richtung durchlaufen werden, ſo bleibt er in allen Lagen in Ruhe. 4) Wenn man einen dünnen, mit Seide umſponnenen Kupferdraht ſchraubenförmig biegt, die einzelnen Drahtringe zu größerer Feſtigkeit an ein Holzſtäbchen bindet, dann die beiden Enden des Drahtes mitten durch den Schraubendraht zurückführt, und an der Mitte austreten läßt, und wenn man einen ſolchen Schraubendraht dann ſo in den Schließungsbogen eines galvaniſchen Stromes einſchaltet, daß er ſich um eine durch die beiden Enden gehende verticale Drehungsare leicht bewegen kann; ſo kommt der Schraubendraht, ſobald der Strom circulirt, nicht eher in Ruhe, als bis ſeine Längenare ſich in den magnetiſchen Meridian eingeſtellt hat. Er verhält ſich auch, ſo lange ein Strom durch ihn hindurch-

*) Zur Anſtellung dieſes und vieler der folgenden Verſuche, bei welchen man es mit beweglichen Strömen zu thun hat, bedient man ſich des Ampère'ſchen Geſtells. Seinen Haupttheilen nach beſteht es aus 2 verticalen meſſingenen Säulen, welche auf einem hölzernen Brette befeſtigt ſind, und an ihrem oberen Ende horizontale Arme haben. An den Enden dieſer horizontalen Arme ſind Queckſilbernäpfchen angebracht, deren Mittelpunkte genau vertical unter einander ſtehen. Am Fuße der Säulen befindet ſich in der Regel noch eine Vorrichtung, vermittelſt welcher man den Strom bald in der einen, bald in der grade entgegengeſetzten Richtung durch die Säulen führen kann.

Digitized by Google

geht, einem Magnete gegenüber ganz wie ein Magnet, dessen Pole genau an seinen Enden liegen; das nach Norden gerichtete Ende wird nämlich von dem Nordpole eines Magnets abgestoßen, von dem Südpole angezogen, das nach Süden gerichtete Ende wird von dem Südpole eines Magnets abgestoßen und von dem Nordpole angezogen. Einen solchen Schraubendraht nennt man einen electrodynamischen Cylinder oder ein Solenoïd (σωλήν, Röhre und εἶδος, Gestalt, also ein röhrenartiger Körper). 5) Wird ein Solenoïd aber so in den Schließungsbogen des Stromes eingeschaltet, daß es um eine horizontale Axe, die durch den Schwerpunkt des Solenoïds geht, mit größter Leichtigkeit beweglich ist, und daß seine Längenaxe in den magnetischen Meridian fällt, so senkt sich, wenn der Strom hindurch geht, das nach Norden gerichtete Ende desselben. Die Lage, in welcher es zur Ruhe kommt, stimmt mit der Lage einer Inclinationsnadel überein.

In den beiden vorhergehenden Paragraphen lernten wir die gegenseitige Einwirkung eines Stroms und eines Magnets auf einander kennen, wir sahen namentlich, wie der Strom unter Umständen auf einen Magnet abstoßend einwirkt. Da man aber nur von einem Magnete weiß, daß er einen anderen Magnet abstoßen könne, so mußte man schließen, daß auch dem electrischen Strome, oder wenigstens einem Körper, durch welchen er circulirt, magnetische Kraft innewohne. Unsere Versuche zeigen die Bestätigung dieses Schlusses. Der Schließungsdraht zieht Eisen an (1), und zeigt im Zustande freier Beweglichkeit das Bestreben, stets eine gewisse Lage anzunehmen (2) als Folge der Einwirkung des Erdmagnetismus auf denselben. Er besitzt also vollständig die 2 unterscheidenden Eigenschaften eines Magnets, wenn auch bemerkt werden muß, daß sie sich bei ihm auf eine andere Art äußern, als bei einem Magnetstabe. Während ein gewöhnlicher Magnetstab das Eisen vorzugsweise an 2 Punkten, den Polen, anzieht, zieht es der Schließungsdraht seiner ganzen Länge nach gleichmäßig an; während der Magnetstab bei freier Beweglichkeit die Richtung von Nord nach Süd nimmt, stellt sich der Schließungsdraht von Ost nach West. Daß der im dritten Versuche beschriebene Draht keine Richtkraft zeigt, erklärt sich daraus, daß nach der getroffenen Einrichtung der Strom in der einen Hälfte dem Drahte grade die entgegengesetzte Drehung geben will, als in der anderen Hälfte, und daß demnach, da beide Hälften fest mit einander verbunden sind, gar keine Drehung stattfinden kann. Ein solcher Draht muß mit der astatischen Doppelnadel verglichen werden. Auffallend für den ersten Anblick möchte der vierte Versuch erscheinen, da wir hier das Solenoïd doch die Richtung von Nord nach Süd annehmen sehen; allein bei näherer Betrachtung wird sogleich klar, daß grade dann, wenn die Axe des Solenoïds von Nord nach Süd gerichtet ist, die Ebenen der einzelnen Windungen des Drahtes, welche von dem Strome durchflossen werden, von Ost nach West eingestellt sind. Wenn das Solenoïd sich noch leichter richtet, als der einfache Draht in dem zweiten Versuche, so hat dies darin seinen Grund, daß das Drehungsbestreben in allen Windungen des Schraubendrahtes dasselbe ist, daß also die Gesammtwirkung desto bedeutender sein muß, aus je mehr Windungen das Solenoïd besteht (vergl. den Multiplicatordraht). Aber die eigentliche Bedeutung des Solenoïds liegt nicht in der größeren Beweglichkeit, sondern darin, daß es die

Digitized by Google

volle Aehnlichkeit eines von einem Strome durchströmten Leiters mit einem gewöhnlichen Magnetstabe herstellt. Bei ihm können wir von einem Nordpol und einem Südpol reden, welche an den Enden desselben liegen, und die Versuche zeigen, daß es dem gewöhnlichen Gesetze der Polarität entsprechend angezogen und abgestoßen wird. Der fünfte Versuch zeigt uns selbst die Uebereinstimmung desselben mit der Inclinationsnadel.

§. 100. **Fortsetzung; Magnetisirung durch den electrischen Strom.** 1) Wenn ein kräftiger electrischer Strom über eine Stahlnadel und zwar senkrecht zu ihrer Länge geführt wird, so zeigt sich die Stahlnadel bleibend magnetisch, selbst wenn der Strom nur wenige Augenblicke gedauert hat. Ihren Nordpol erhält die Stahlnadel ganz der Ampère'schen Regel entsprechend da, wo die linke Hand des Schwimmers hinweiset. Die Wirkung wird auch hier wieder bedeutend verstärkt, wenn man statt des einfachen Schließungsdrahtes einen spiralförmig gewundenen anwendet, in welchen man die Nadel der Länge nach einschiebt. Nur muß hier verhindert werden, daß der Strom nicht von einer Windung seitlich auf die zunächst liegenden Windungen, noch auch auf die Nadel selbst übergehen kann. Man wird daher den Draht entweder über eine Glasröhre winden, in welche die Nadel gelegt wird, oder man wird mit Seide übersponnenen Draht anwenden. Elias hat vor mehreren Jahren eine Methode angegeben, durch welche man vermittelst des electrischen Stroms sowohl grade, als auch hufeisenförmig gebogene Stahlstäbe selbst stärker magnetisiren kann, als dies durch die besten gebräuchlichen Streichmethoden möglich ist. Ein etwa 30 Fuß langer, dicker, mit Seide umsponnener Kupferdraht wird zu einer Drahtrolle aufgewunden, deren innere Höhlung den Dimensionen der zu magnetisirenden Stäbe entsprechen muß. Während ein kräftiger Strom durch diese Drahtrolle circulirt, steckt man den Stahlstab hinein, und bewegt ihn mehrmals bis an die Enden auf und nieder. Zuletzt öffnet man die Kette, wenn der Stab sich mit seinem mittleren Theile in der Rolle befindet. Dabei ist es gut, grade Stahlstäbe oben und unten mit einem Stück weichen Eisens, und hufeisenförmige Lamellen mit einem Anker während der Operation zu versehen. Böttger hat statt der Drahtrollen Kupferbandspiralen vorgeschlagen, und empfiehlt bei der Magnetisirung von Hufeisenlamellen das Kupferband in 2 Spiralen aufzuwickeln, so daß die beiden Schenkel der Lamelle gleichzeitig in die beiden Spiralen eingeschoben, und in denselben auf und ab bewegt werden können. 2) Wenn man einen graden oder hufeisenförmig gebogenen Stab aus weichem Eisen mit einer Spirale aus dickem, mit Seide übersponnenen Kupferdraht umwickelt, und durch die Spirale einen Strom hindurch leitet, so werden die Stäbe zu Magneten. Hatte man bei Stäben in Hufeisenform zuvor einen Anker vorgelegt, so erhalten sie eine unerwartet große Tragkraft. Man hat bereits welche construirt, die mehrere Tausend Pfund tragen. Solche Magnete nennt man, weil ihr Magnetismus durch den electrischen Strom hervorgerufen ist, Electromagnete. Wird der Strom wieder unterbrochen, so verschwindet ihr Magnetismus auch wieder, bei Hufeisen mit vorgelegtem Anker jedoch nicht sogleich, wenngleich ihre Tragkraft bedeutend geringer wird, sondern erst nach abgerissenem Anker. Auch bei den Electromagneten aus weichem Eisen lassen sich die Pole ganz nach der Ampère'schen Regel bestimmen. Daß sich dieselben auch benutzen lassen, um in Stahlstäben durch

Digitized by Google

Bestreichen bleibenden Magnetismus hervorzurufen, braucht wohl nicht besonders bemerkt zu werden.

Wir sehen demnach, daß ein von einem electrischen Strome durchströmter Leiter nicht nur alle Eigenschaften eines gewöhnlichen Magnets besitzt, sondern auch daß er ganz dieselben Wirkungen, wie dieser, hervorzubringen vermag, daß er namentlich in den des Magnetismus fähigen Körpern diesen erregen kann, daß er dem Stahle wegen seiner Coërcitivkraft bleibenden, dem weichen Eisen dagegen nur vorübergehenden Magnetismus ertheilt. Jacobi und Lenz haben die Gesetze aufgesucht, nach welchen der Strom den Magnetismus im weichen Eisen hervorrufe, und sind zu folgenden Resultaten gelangt: 1) die Größe des Magnetismus ist unter sonst gleichen Umständen genau der Stärke der angewandten Ströme proportional. 2) Bei gleich starken Strömen und gleicher Anordnung ist die Dicke des Spiraldrahts ohne Einfluß. 3) Die Weite der Windungen hat, wenn das Eisen weit genug aus demselben hervorragt, ebenfalls keinen Einfluß auf die Stärke des Magnetismus. 4) Die Totalwirkung sämmtlicher Windungen ist der Summe der Wirkungen der einzelnen Windungen gleich. 5) Der Magnetismus, welchen Eisenstäbe von gleicher Länge bei gleichen Strömen annehmen, ist ihrem Durchmesser proportional.

In Beziehung auf das erste Gesetz hat jedoch in neuester Zeit Müller nachgewiesen, daß es nur innerhalb gewisser Grenzen, nur für dicke Stäbe und schwächere Ströme richtig ist, daß aber die magnetische Kraft eines Eisenstabs nur bis zu einem gewissen Maximum gesteigert werden kann.

§. 101. **Fortsetzung; Anwendungen des Electromagnetismus.** Als Anwendungen, welche man bis jetzt von der electromagnetischen Kraft gemacht hat, oder zu machen versucht hat, müssen folgende erwähnt werden:

1) als bewegende Kraft zum Maschinenbetriebe. Die von Electromagneten geäußerte große Kraft mußte auf den Gedanken führen, diese Anwendung zu versuchen. Die Möglichkeit derselben ersieht man aus einem von Ritchie construirten kleineren Apparate. Zwischen den Schenkeln eines festen hufeisenförmigen Stahlmagnets, dessen Pole nach Oben gerichtet sind, kann um eine verticale Are in der Nähe der Pole ein horizontal liegender Electromagnet rotiren. Sobald der Strom um denselben circulirt, wird er polar. Je nach der Stellung, in welcher er sich grade befindet, werden seine Pole nun entweder von den Polen des Stahlmagnets angezogen oder abgestoßen. Er bewegt sich also, bis der Nordpol des Stahlmagnets seinem Südpol, und der Südpol seinem Nordpol gegenübersteht. In diesem Augenblicke wird dann der Strom grade in entgegengesetzter Richtung um ihn geführt, dadurch werden auch seine Pole umgekehrt, und mit den benachbarten des Stahlmagnets gleichnamig, sie werden demnach abgestoßen, und er rotirt in der anfänglichen Richtung weiter. Da die Umkehrung der Pole immer in dem Augenblicke geschieht, in welchem die ungleichnamigen Pole beider Magnete einander gegenüber stehen, so wird dadurch eine continuirliche Rotation hervorgebracht. Als Abänderung und Vervollkommnung dieses Apparats hat man einen anderen construirt, bei welchem zugleich durch die Rotation des Electromagnets ein Gewicht gehoben werden kann. Der Stahlmagnet ist hier auch durch einen Electromagnet ersetzt, und der rotirende Magnet hat nicht, wie bei Ritchie's Apparat, die Gestalt eines graden Stabes, sondern ist ebenfalls hufeisen-

Digitized by Google

förmig. An seiner Umdrehungsaxe ist ein Zahnrad befestigt, welches in ein zweites von größerem Halbmesser eingreift. Um die Axe dieses zweiten Zahnrades ist eine Schnur geschlungen, die über eine Rolle weggeht, und an deren Ende ein Gewicht hängt, welches durch die Rotation des inneren Electromagnets gehoben wird. Ehe wir von den im Großen angestellten Versuchen reden, wollen wir noch einen hierher gehörigen, in neuester Zeit von Stöhrer construirten Apparat erwähnen, da bei demselben die Rotation des Electromagnets auf andere Weise, als bei den 2 eben besprochenen Apparaten erzeugt wird. Der bewegliche Electromagnet hat bei Stöhrer wieder die Gestalt eines graden Stabes, und kann um eine horizontale Axe im Innern von länglichen Rahmen rotiren, welche mit dickem, mit Seide umsponnenen Kupferdrahte umwunden sind. Sobald der Strom durch die Drahtrollen und um den Electromagnet geht, muß der letztere durch die Einwirkung des Stroms in den ersteren eine verticale Stellung annehmen, und seinen Nordpol je nach der Richtung des Stromes in den Drahtrollen oben oder unten haben. In demselben Momente, in welchem der Magnet diese Stellung erlangt hat, erhält der Strom in den Drahtrollen die entgegengesetzte Richtung, wodurch der Electromagnet gezwungen wird, sich weiter zu bewegen, bis der Pol desselben, welcher eben unten war, nach Oben gerichtet ist. Nun erfolgt abermals eine Umkehrung des Stroms in den Drahtrollen, der Magnet kann also wieder nicht zur Ruhe kommen, und bewegt sich weiter. Auf diese Weise wird ebenfalls eine beständige Rotation des Electromagnets erzielt, der aber hier nicht nach jeder halben Umdrehung seine Pole wechselt, da der ihn umkreisende Strom immer dieselbe Richtung beibehält. Aber grade in diesem Umstande liegt der Vorzug des Stöhrer'schen Apparats, indem die anderen Maschinen durch den Polwechsel einen Theil ihrer Wirksamkeit verlieren, da bei jedem Wechsel immer erst die frühere Polarität überwunden werden muß, und demnach die Eisenstäbe nie den vollen Magnetismus erlangen, welcher der Stromstärke entspricht.

Was nun die vielfachen Bemühungen betrifft, den Electromagnetismus auch praktisch im Großen als bewegende Kraft anzuwenden, und die Dampfkraft durch ihn zu ersetzen, so haben diese bis jetzt noch zu keinen günstigen Resultaten geführt. Besonders war es Jacobi in Petersburg und Wagner in Frankfurt, sowie einige Amerikaner, wie Page, Callan, Davenport, welche die Sache mit großem Eifer verfolgten. Jacobi hat wirklich ein Boot von 28 Fuß Länge, 7½ F. Breite und 2¾ F. Tiefe im Wasser construirt, welches 14 Personen trug, und sich mit einer Geschwindigkeit von 2¼ engl. Meilen in der Stunde auf der Newa bewegte, so daß die Kraft, mit welcher seine Maschine arbeitete, etwa ¾ bis 1 Pferdekraft betrug. Auch von einer electromagnetischen, von einem Engländer Davidson gebauten Locomotive war einmal in den Journalen die Rede, welche 16 F. lang und 7 F. breit war, und auf der Edinburg-Glasgower Eisenbahn 4 engl. Meilen in der Stunde zurücklegte, ohne daß jedoch andere Wagen an sie angehängt gewesen wären. Gesetzt aber auch, es wären bereits alle Schwierigkeiten der Construction vollkommen überwunden, so würde auch die Frage noch zu erörtern sein, ob bei gleichen Leistungen der Betrieb wenigstens nicht höhere Kosten verursache, als bei der gegenwärtig so weit verbreiteten Dampfkraft, und man muß gestehen, daß man nach dem gegen-

Digitized by Google

wärtigen Stande unſerer Kenntniſſe eher geneigt ſein muß anzunehmen, daß ſich die Koſten bei der electromagnetiſchen Kraft höher belaufen werden, als bei der Dampfkraft.

2) Zur Telegraphie. Die ungeheure Geſchwindigkeit, mit welcher ſich der electriſche Strom durch Leitungsdrähte hindurchbewegt, macht denſelben zur Telegraphie (Schreibung in die Ferne, τέλος, Ende, Ferne und γράφειν, ſchreiben) ganz beſonders geeignet, und um ſo mehr, als die Wirkſamkeit ſolcher electriſchen Telegraphen nicht wie diejenige der früher allgemein gebrauchten optiſchen Telegraphen von der Witterung und von der Tageszeit abhängt. Wirklich wurde auch ſchon im Jahre 1808 von Sömmering in München ein Apparat conſtruirt, in welchem er die durch den Strom bewirkte Waſſerzerſetzung zum Telegraphiren benutzte. Auf derjenigen Station, wohin eine Nachricht gelangen ſollte, waren in einem ſchmalen Waſſerbehälter 35 mit Waſſer gefüllte und mit Buchſtaben oder Ziffern bezeichnete Gläschen umgeſtülpt; auf der anderen Station befanden ſich ebenſo viele und ebenſo bezeichnete Meſſingcylinderchen, von welchen jedes das eine Ende eines Drahtes trug, der zu der entfernten Station hinlief, und dort mit ſeinem vergoldeten anderen Ende in das entſprechende Gläschen mündete. Wurden nun 2 dieſer Cylinder mit den Polen einer Volta'ſchen Säule verbunden, ſo zerſetzte der entſtandene Strom in denjenigen Gläschen, in welchen die entſprechenden Drähte endigten, das Waſſer, deſſen gasförmige Beſtandtheile in die Höhe ſtiegen, und ſo 2 Zeichen zugleich gaben, deren Reihenfolge dadurch beſtimmt war, daß immer der Buchſtabe des Waſſerſtoffgläschens voranging. Schon die große Menge der erforderlichen Drähte machte, daß dieſer Apparat nicht in allgemeinen Gebrauch kommen konnte. Anders geſtaltete ſich die Sache nach Erfindung des Electromagnetismus, da man jetzt mit einer und derſelben Leitung eines Stromes ſeinen Zweck erreichen konnte, beide Stationen alſo nur durch 2 Drähte mit einander verbunden zu werden brauchten. Im Jahre 1838 machte Steinheil noch die Entdeckung, daß das Erdreich ſelbſt ſich als Leiter für den Strom benutzen laſſe, und erſetzte den einen der 2 Drähte dadurch, daß er auf jeder Station in dem feuchten Erdreich eine große Metallplatte eingrub, und dieſe durch Drahtſtücke mit den Apparaten verband. Die electromagnetiſchen Telegraphen nun, die ſich in ſo kurzer Zeit ſchon faſt über die ganze civiliſirte Erde verbreitet haben, ja ſelbſt ſchon über das Meer hingeleitet werden (von Calais nach Dover; auch von einer telegraphiſchen Verbindung Englands mit Nordamerika iſt ernſtlich die Rede), laſſen ſich unter folgende 3 Klaſſen bringen: 1) Nadeltelegraphen, 2) Zeigertelegraphen, und 3) Drucktelegraphen. Die Nadeltelegraphen, welche hauptſächlich auf den engliſchen Linien im Gebrauch ſind, beruhen auf dem Oerſted'ſchen Fundamentalverſuch, da ja, je nach der Richtung, welche man dem Strome gibt, eine Magnetnadel bald nach der einen, bald nach der anderen Seite abgelenkt wird. Durch eine Combination dieſer zwei Elementarzeichen läßt ſich dann das Alphabet bilden. Es muß hier genügen, nur die Principe, auf welchen die Conſtruction der verſchiedenen telegraphiſchen Apparate beruht, anzuführen; wer eine nähere Beſchreibung derſelben wünſcht, findet dieſelbe in Müller's Bericht über die neueſten Fortſchritte der Phyſik, Bd. I. pag. 559 u. f. Der erſte, wirklich ausgeführte, brauchbare electriſche

Digitized by Google

Telegraph war ein solcher Nadeltelegraph, es war derjenige, durch welchen im Jahre 1833 Gauß und Weber das physicalische Cabinet in Göttingen mit der Sternwarte verbanden. Bei den Zeigertelegraphen läuft der Draht spiralförmig um einen Electromagnet, der sich auf derjenigen Station befindet, wohin telegraphirt wird. Sobald der Strom geschlossen ist, zieht der Electromagnet seinen Anker an, bei der Oeffnung dagegen drückt eine Feder den Anker wieder ab. Diese Bewegungen des Ankers werden durch geeignete mechanische Vorrichtungen auf einen Zeiger übertragen, der sich vor einer mit Buchstaben und Ziffern besetzten Scheibe dreht, und nach der Willkür des auf der anderen Station befindlichen Telegraphisten vor dem einen oder dem anderen dieser Zeichen angehalten werden kann, indem derselbe den Strom nur eine etwas längere Zeit entweder geöffnet oder geschlossen läßt, je nachdem der Zeiger durch das Abfallen oder die Anziehung des Ankers seine letzte Bewegung erhalten hat. Die bewährtesten und vollkommensten Zeigerapparate sind bis jetzt die von Siemens und Halske construirten, welche auch in Preußen, Braunschweig und Belgien vielfach in Gebrauch sind. Was endlich die Druck- oder Amerikanischen Telegraphen betrifft, so ist bei den fast allein in Anwendung gekommenen Morse'schen Apparaten der Anker des Electromagnets das eine Ende eines zweiarmigen Hebels, an dessen anderem Ende ein Stift angebracht ist. Durch ein System von Rädern werden 2 einander sehr nahe liegende Walzen in eine entgegengesetzte Bewegung versetzt, und dadurch wird ein langer und schmaler Streifen Papier in gleichmäßiger Bewegung zwischen diesen Walzen durchgezogen. Ist nun der Strom geschlossen, und zieht der Electromagnet seinen Anker an, so wird dadurch an dem anderen Ende des Hebels der Stift gegen das Papier gedrückt, wodurch ein Eindruck in demselben hervorgebracht wird. Dieser Eindruck ist, wenn der Strom nur einen Augenblick geschlossen bleibt, ein Punkt, bei längerer Dauer eine Linie. Diese beiden Elementarzeichen, einzeln, oder zu 2, 3 u. s. w. combinirt, geben dann die Buchstaben und Ziffern.

Noch soll hier Bakewell's electrochemischer Telegraph erwähnt werden, der im November 1850 zum ersten Male beschrieben wurde, bis jetzt aber noch nicht auf großen Linien in Anwendung gekommen ist. Auf beiden Stationen ist eine Metallwalze, welche durch ein Uhrwerk regelmäßig und sehr rasch umgedreht wird. Ehe telegraphirt wird, wird um die Walze ein Bogen Papier gelegt, der mit einer mit Salzsäure angesäuerten Auflösung von Blutlaugensatz angefeuchtet wurde. Das Papier wird dadurch ein Leiter für den Strom, und das Blutlaugensalz wird, sobald der Strom hindurch geht, zersetzt und Berlinerblau gebildet, wodurch das Papier an allen Stellen, durch welche der Strom geführt wird, tiefblau gefärbt erscheint. Auf derjenigen Station jedoch, von welcher aus telegraphirt werden soll, wird auf den Bogen Papier, ehe er auf die Walze gebracht wird, die Depesche mit einer isolirenden Tinte in starken Zügen geschrieben. An die Walzen drücken sich stählerne Griffel an, die ebenfalls durch das Uhrwerk bewegt werden, und dann auf dem Papier der Walzen eine enge Spirallinie beschreiben. Sobald der Strom geschlossen ist, geht er auf der ersten Station durch den Griffel auf die Walze durch den Leitungsdraht zur zweiten Station, hier wieder durch den Griffel zur Walze

Digitized by Google

und dann zurück zur Batterie. Wäre nun auf dem Papier der ersten Station die Depesche nicht aufgeschrieben, so würden auf beiden Papierbogen durch Berührung der Griffel tiefblaue Spirallinien erzeugt werden. So oft aber auf der ersten Station der Griffel sich über einen Schriftzug der Depesche hinbewegt, ist der Strom unterbrochen, und es wird demnach auch auf der zweiten Station in demselben Moment das Blutlaugensalz nicht zersetzt, die betreffende Stelle des Papiers bleibt demnach weiß. Auf diese Weise erhält man also auf der zweiten Station die Schriftzüge der Depesche weiß auf blauem Grunde.

3) Bei Uhrwerken. Hier hat man die electromagnetische Kraft angewandt, um in einer gewöhnlichen Uhr das Gewichtwerk zu ersetzen, also die fortdauernde gleichförmige Bewegung des Pendels zu unterhalten. Die Linse des Pendels vertritt hier eine Drahtspirale, der von beiden Seiten in ihrer Schwingungsebene die ungleichnamigen Pole zweier Magnete gegenüberstehen. Sobald das Pendel nach dem einen Pol hin aufgehoben wird, wird dadurch der Strom durch die Spirale geschlossen. Die Spirale ist aber so gewunden, daß sie nun von dem genäherten Pole abgestoßen und von dem gegenüberliegenden angezogen wird. Indem sie sich nun nach dem letzteren hinbewegt, wird der Strom wieder unterbrochen, das Pendel schwingt also wieder zurück, wodurch dann der Strom von Neuem geschlossen wird. So dauert die Bewegung fort, die noch auf die gewöhnliche Weise durch Räder auf den Zeiger übertragen wird. Diese, wenn auch sinnreiche, Anwendung dürfte doch keine allgemeine Verbreitung finden, da sie vor der gewöhnlichen einfachen Art, die Bewegung des Pendels zu erhalten, keine besonderen Vortheile bietet.

Eine andere hierher gehörige Anwendung ist die, durch eine gewöhnliche Normaluhr mehrere entfernte Uhren zu gleicher Zeit in vollkommen übereinstimmendem Gange zu erhalten. Durch die Bewegung des Pendels in der Normaluhr wird der Strom abwechselnd geschlossen und geöffnet. Von dem Pendel geht aber auch eine Drahtleitung nach der ersten, zweiten u. s. f. zu regulirenden Uhr und von der letzten derselben zurück zur Batterie, so daß sie alle in den Schließungsbogen eingeschaltet sind. In jeder secundären Uhr bildet der Draht eine Spirale um einen Electromagnet. An dem freien Ende der Anker der Electromagnete ist eine hakenförmige Klinke befestigt, deren Haken in die Zähne eines Rades eingreift, während durch einen Sperrhaken eine rückgängige Bewegung dieses Rades verhindert wird. Wenn nun durch die Bewegung des Pendels der Normaluhr der Strom geschlossen wird, so werden auf sämmtlichen Stationen in demselben Momente die Anker der Electromagnete angezogen, und dadurch legen sich die hakenförmigen Klinken in die folgenden Zahnlücken der entsprechenden Räder. Wenn dann durch den Rückgang des Pendels der Strom wieder unterbrochen wird, so werden durch Federn die Anker und die mit denselben verbundenen Klinken zurückgezogen. Die Klinke nimmt aber dabei einen Zahn des Rades mit. Daß die Bewegung dieses Rades dann auf andere Räder und auf die Zeiger übertragen wird, braucht wohl nicht erst erwähnt zu werden.

Bekanntlich ist es für den beobachtenden Astronomen von der größten Wichtigkeit, für seine Beobachtungen und die Dauer derselben die genau entsprechende Zeit angeben zu können. Nun ist es aber für dieselbe Person

Digitized by Google

äußerst schwer, bei Anfang und Ende ihrer Beobachtung ganz gleichzeitig den Stand einer Uhr abzulesen. Diesem Uebelstande wird durch die von Professor Locke in Nordamerika vor ganz kurzer Zeit erfundenen galvanisch registrirenden Uhren abgeholfen, die demnach auch für die Astronomie von großer Bedeutung zu werden versprechen. Das Wesentliche der Einrichtung derselben wird von Lamont (astron. Kalender für das Königreich Baiern auf das Jahr 1852) so beschrieben: „Zu einer galvanisch registrirenden Uhr braucht man als Haupttheil eine gewöhnliche astronomische Uhr mit folgender specieller Einrichtung. Die Axe, an welcher der Secundenzeiger festgemacht ist, trägt ein besonderes Rad mit 60 Zähnen. So oft eine Secunde springt, bewirkt ein Zahn dieses Rades eine augenblickliche Schließung einer galvanischen Kette, in welcher sich ein Electromagnet befindet. In dem Momente, wo die Kette geschlossen wird, zieht der Electromagnet seinen Anker an. Dabei macht ein mit dem Anker verbundenes spitziges Hämmerchen einen Punkt auf einen darunter befindlichen Papierstreifen. Da der Papierstreifen mittelst eines Laufwerks mit gleichmäßiger Geschwindigkeit sich unter dem Hämmerchen vorwärts bewegt, so wird auf solche Weise eine Reihe von Punkten auf dem Papierstreifen entstehen, welche die Zeitsecunden vorstellen. Das Rad, welches die Schließung der Kette bewirkt, ist so eingerichtet, daß bei der 60sten Secunde die Schließung etwas länger dauert; es entsteht demnach bei jeder Minute auf dem Papier anstatt eines Punktes ein kurzer Strich. Auf solche Weise werden die vollen Minuten erkennbar gemacht. Neben dem eben besprochenen Electromagnete ist aber ein zweiter festgemacht, der ebenfalls mit Anker und Hämmerchen versehen ist, und einer Kette angehört, die der Beobachter beliebig schließen kann dadurch, daß er mit dem Finger auf eine Taste (ähnlich einer Klaviertaste) anschlägt. Die 2 Hämmerchen befinden sich unmittelbar neben einander, und so oft die Taste angeschlagen wird, macht das zweite Hämmerchen einen Punkt in gleicher Weise, wie das erste. Diese Punkte werden Beobachtungspunkte genannt. Nach der gegebenen Erklärung wird man sich den Gebrauch leicht vorstellen können. Es sei z. B. eine Sonnenfinsterniß zu beobachten, so steht man durch das Fernrohr, und hält den Finger an die Taste, bis der Mondrand die Sonne berührt. In dem Augenblicke, wo die Berührung stattfindet, schlägt man die Taste an, und ein Punkt ist auf dem Papierstreifen gemacht.“ Je rascher der Papierstreifen bewegt wird, desto weiter kommen offenbar die Sekundenpunkte von einander abzustehen; je weiter diese aber von einander abstehen, desto leichter ist es möglich, noch ganz kleine Theile einer Sekunde zu bestimmen.

§. 102. **Gegenseitige Einwirkung der electrischen Ströme auf einander.** 1) Wenn man eine schlaffe Spirale von dünnem, mit Seide übersponnenem Kupferdraht lothrecht aufhängt, und ihre untere Spitze eben in ein Queckſilbergefäß tauchen läßt, wenn man dann durch die Spirale einen galvanischen Strom leitet, so zieht sich die Spirale zusammen, das untere Ende wird dadurch aus dem Queckſilber ausgehoben, die Spirale dehnt sich dann wieder aus, so daß dieses Ende mit dem Queckſilber wieder in Berührung kommt, und so geht es fort, die Spirale schwingt der Länge nach auf und nieder, so lange der Strom unterhalten wird. 2) Wenn man in der Nähe des rechtwinklig umgebogenen, um eine verticale Axe beweglichen

Digitized by Google

Drahtes, welchen wir in dem zweiten Versuch §. 99 erwähnt haben, einen ähnlichen, ebenfalls um eine verticale Axe beweglichen aufhängt, und zwar so, daß zwei verticale Seiten derselben nahe kommen, und man leitet durch jeden derselben einen Strom, der in beiden entweder von Unten nach Oben in den verticalen Seiten oder auch umgekehrt circulirt, so bemerkt man eine gegenseitige Anziehung der beiden verticalen Seiten. Wenn aber in dem einen Drahte der Strom von Unten nach Oben, in dem anderen dagegen von Oben nach Unten geht, so beobachtet man eine Abstoßung. Die Stelle des zweiten beweglichen Drahtes kann auch ein vertical aufgerichteter fester Draht versehen, nur ist dann Anziehung und Abstoßung nicht gegenseitig, sondern beschränkt sich natürlich nur auf den beweglichen Draht. 3) Wenn man unter der unteren horizontalen Seite des beweglichen Drahtes einen festen Draht so anbringt, daß seine Richtung nicht parallel dieser unteren Seite geht, und man leitet durch beide einen galvanischen Strom, so findet man ebenfalls, daß der bewegliche Draht von dem festen bald angezogen, bald abgestoßen wird. Untersucht man die Bedingungen näher, unter welchen das Eine oder das Andere stattfindet, so zeigt sich Anziehung, wenn beide Ströme nach der Seite hin sich bewegen, wo die Drähte convergiren, und ebenso, wenn beide die entgegengesetzte Richtung haben, Abstoßung dagegen, wenn nur der eine sich nach der convergirenden, der andere aber nach der divergirenden Seite bewegt. Der Versuch kann auch mit Anwendung des folgenden Apparates gemacht werden.

Fig. 15.

In einem Holzbrette ist eine kreisförmige Rinne (Fig. 15) eingeschnitten, welche an zwei gegenüberliegenden Stellen m und m′ durch isolirende Scheidewände in zwei halbkreisförmige Rinnen getheilt ist. In der Mitte c ist ein Stift angebracht, um den sich eine kupferne Nadel aa′, deren Enden a und a′ von Eisen und rechtwinklich umgebogen sind, so daß sie in die Rinne eintauchen, drehen läßt. Auf der oberen Spitze des Stifts ruht eine ähnliche kupferne Nadel bb′. Wird nun Quecksilber in die halbkreisförmigen Rinnen gegossen und in jede derselben ein Polardraht einer Säule gebracht, so wird bc von ac und b′c von a′c abgestoßen, wenn $\sphericalangle acb \leqq 1R.$; bc wird aber von a′c und b′c von ac angezogen, wenn $\sphericalangle acb > 1R.$ ist.

Fig. 16.

4) Ein mit Quecksilber gefülltes Gefäß AB (Fig. 16) ist durch eine isolirende Scheidewand mm′ in zwei Abtheilungen getheilt. Ein mit Seide übersponnener Kupferdraht abcd ist so gebogen, daß er von einer Abtheilung in die andere führt, und daß sich in jeder Abtheilung noch ein horizontaler Arm, ab und cd, befindet, welcher der Scheidewand parallel ist. ab und cd sind bei c und d umgebogen, so daß sie mit den umgebogenen Enden in das Quecksilber eintauchen. Die auf dem Quecksilber schwimmenden Theile ab und cd sind mit Wachs überzogen. Werden nun die beiden Polardrähte p und p′ einer Säule so in die beiden Abtheilungen des Gefäßes eingetaucht, daß p in die Verlängerung von ba und p′ in die von cd fällt, und die Säule also auch durch den Draht abcd geschlossen ist, so bewegt sich der Draht abcd von den Poldrähten fort.

Digitized by Google

Vor Entdeckung des Electromagnetismus kannte man nur die Abstoßung eines Magnets durch einen anderen Magnet, durch den Electromagnetismus lernte man auch die Abstoßung eines Magnets durch einen galvanischen Strom kennen, man sah also, daß in der gegenseitigen Einwirkung zweier Magnete auf einander der eine durch einen galvanischen Strom vertreten werden könne. Es lag daher der Gedanke nah, zu untersuchen, ob nicht auch an die Stelle des zweiten Magnets ein galvanischer Strom treten könne. Wie die obigen Versuche zeigen, haben diese Untersuchungen auch wirklich zu dem Resultate geführt, daß ein galvanischer Strom auf einen anderen bewegend einwirke. Diese wichtige Entdeckung verdankt die Wissenschaft den Forschungen Ampère's. Die obigen, größtentheils von diesem Physiker herrührenden Versuche lehren uns zugleich die Gesetze kennen, nach welchen diese gegenseitige Einwirkung zweier Ströme stattfindet. So ersehen wir aus dem zweiten Versuche, daß zwei parallele Ströme sich anziehen, wenn beide dieselbe Richtung haben, daß sie sich dagegen abstoßen, wenn die Richtung des einen derjenigen des anderen entgegengesetzt ist. Das eben angeführte Gesetz in seinem ersten Theile wird auch durch den ersten Versuch bestätigt. Da die Windungen der Spirale einander parallel sind, so können wir uns vorstellen, daß wir so viele parallele Ströme hätten, als Windungen da sind, und da alle nach derselben Richtung parallel sind, so müssen sich demnach die einzelnen Windungen einander anziehen. Dadurch wird das untere Ende gehoben, und außer Berührung mit dem Queckſilber gebracht. Nun ist der Strom unterbrochen, die gegenseitige Anziehung der einzelnen Windungen hört also auf, die Spirale nimmt vermöge ihrer Elasticität ihre ursprüngliche Länge wieder an, wodurch die untere Spitze wieder mit dem Queckſilber in Berührung kommt, und der Strom von Neuem geschlossen wird. Vergleicht man nun die Resultate der Versuche unter 3 mit dem eben aufgestellten Gesetze, so wird man bald finden, daß Anziehung und Abstoßung hier nur Folge davon sind, daß die beiden Ströme das Bestreben haben, sich so zu stellen, daß sie einander parallel gehen, und zwar parallel nach derselben Richtung. Da in 4, wenn p der Draht ist, welcher von dem positiven Pole kommt, der Strom von p durch das Queckſilber nach ab, nach cd, dann wieder durch das Queckſilber nach p' und zurück zur Säule geht, so lassen sich p und ab, und ebenso cd und p' als Theile eines und desselben geradlinigen Stromes ansehen, und wir lernen demnach, daß die verschiedenen zusammenhängenden Theile eines und desselben gradlinigen Stromes sich gegenseitig abstoßen. Bei näherer Betrachtung wird sich auch dieses Resultat nur als ein besonderer Fall von 3 herausstellen.

Fig. 17.

Denn denken wir uns, daß der Strom durch einen in einem Winkel gebogenen Leiter abc (Fig. 17) in der Richtung der Pfeile gehe, so muß, da die Ströme in ab und in bc sich abzustoßen suchen, dies aber wegen der Festigkeit der Theile ab und bc nicht möglich ist, wenigstens ein Bestreben des Stromes angenommen werden, den Draht zurückzubiegen, und abc geradlinig zu machen. Denken wir uns aber den Strom in einem gradlinigen Leiter durch irgend einen Punkt in zwei Theile getheilt, so geht offenbar der eine Theil nach dem Punkt hin, und

Digitized by Google

der andere von ihm weg, folglich muß auch jetzt noch das Bestreben der einzelnen Theile, sich gegenseitig abzustoßen, angenommen werden, was denn auch in dem angeführten Versuche durch die Erfahrung bestätigt wird.

§. 103. **Ampère's Theorie des Magnetismus.** Die Beobachtung, daß zwei freischwebende electrische Verbindungsdrähte bei gleichlaufender Strömung einander anziehen, und bei entgegengesetzter einander abstoßen, mithin sich als wirkliche Magnete zeigen, und daß sich die verschiedenen Formen, in denen sich ein gemeiner Magnet als bloßer Stab, als Declinationsnadel, als Inclinationsnadel, und sogar als astatische Nadel zeigt, durch den galvanischen Leitungsdraht gleichfalls darstellen lassen, brachte Ampère auf den Gedanken, den Magnetismus mit der Electricität für identisch zu halten. Nach ihm kann also von dem Vorhandensein zweier eigenen magnetischen Flüssigkeiten, wie wir oben angenommen haben, nicht die Rede sein. Der Umstand, daß namentlich Solenoïde in ihrem wesentlichen Verhalten sowohl gegen einander, als auch gegen galvanische Verbindungsdrähte und wirkliche Magnete diesen letzteren vollkommen gleichen, führte ihn zu der Annahme, den Magnetismus electrischen Strömungen zuzuschreiben, welche in senkrecht auf die Axen der Magnete gerichteten Ebenen liegen. Wie bei einem Solenoïd muß alsdann die Richtung der den Magnet umkreisenden Ströme so gedacht werden, daß, wenn man das Gesicht dem Nordpol des Magnets zukehrt, die Ströme von Rechts durch Oben nach Links gehen. Weil aber, wenn ein Magnet zerbrochen wird, wieder jeder Theil desselben beide entgegengesetzte Pole zeigt, so durfte nicht angenommen werden, daß ein zusammenhängender electrischer Strom in zahllosen Windungen die ganze Masse des Magnets umkreise, sondern um jedes Molecül des Magnets mußte ein eigener, in sich selbst zurückkehrender Strom vorausgesetzt werden. Doch kann man sich als die Resultirende aller die Molecüle desselben Querschnitts umkreisenden Ströme auch nur einen einzigen, den Querschnitt selbst umkreisenden Strom denken, so daß alsdann ein Magnetstab als umgeben von einem Systeme unter sich paralleler, geschlossener Ströme gedacht werden müßte. Das Magnetisiren besteht dann im Erregen oder Anordnen schon bestehender electrischer Ströme, und die Einwirkung zweier Magnete auf einander ist Nichts, als die im vorhergehenden Paragraph beschriebene gegenseitige Einwirkung electrischer Ströme. Auch der Magnetismus der Erde wird von sie umkreisenden electrischen Strömen abgeleitet, die, da der dem Nordpol eines Magnets gleichnamige Pol bei der Erde im Süden liegt, von Ost nach West circuliren.

Es kann nicht geläugnet werden, daß sich gegen diese Theorie Ampère's noch gar Manches einwenden läßt, wie z. B., daß wir in der Erfahrung durchaus keine selbstständig bestehenden electrischen Ströme, wie sie hier angenommen werden, nachweisen können, daß diese electrischen Ströme, welche die Magnete umkreisen, doch auch die übrigen electrischen Wirkungen hervorbringen müßten, daß man keinen Grund einsieht, warum der Magnetismus im Eisen nicht ebenso bleibend erhalten wird, wie im Stahle, da doch beide in ihrer electrischen Leitungsfähigkeit nicht von einander abweichen, warum die den Magnetismus im Stahle erzeugenden Strömungen nicht auch eine gleiche Wirkung in den anderen Metallen hervorrufen da doch der Stahl weder zu den besten, noch zu den schlech-

Digitized by Google

testen Leitern der Electricität gehört. Der letzte Einwand hat freilich durch die Erfindung des Diamagnetismus sein Gewicht verloren. Doch dürfte gerade die Erklärung der diamagnetischen Erscheinungen der Ampère'schen Theorie noch viele Schwierigkeiten darbieten, wenngleich schon mehrere Versuche dazu gemacht worden sind. (So erklärt sich Faraday die verschiedenen Erscheinungen des Diamagnetismus durch die Annahme von electrischen Strömen, welche den nach Ampère's Theorie in einem magnetischen Eisenstücke vorhandenen in ihrer Richtung gerade entgegengesetzt sind; Feilitzsch dagegen nimmt an: „in magnetischen, wie in diamagnetischen Substanzen finden sich electrische Molecularströme vor, welche durch den Magnetismus oder durch den electrischen Strom so gerichtet werden, daß sie sich in gleichem Sinne mit denjenigen Strömen bewegen, welche den magnetisirenden Einfluß ausüben; es findet einzig der Unterschied statt, daß die diamagnetischen Körper der richtenden Kraft einen größeren Widerstand entgegensetzen, als die magnetischen Körper; der Widerstand der diamagnetischen Körper ist so groß, daß die Molecularströme derselben von dem Centrum der Erregung aus in weit beträchtlicherem Maßstabe abnehmen, als dieses in magnetischen Substanzen der Fall ist.“) Obschon demnach diese Theorie noch viele Fragen beantworten muß, ehe sie in der Wissenschaft zu allgemeiner Annahme gelangen kann, so läßt sich ihr doch das nicht absprechen, daß sie uns bei dem leichteren Zurechtfinden in einer großen Menge von Erscheinungen wesentliche Dienste leistet.

§. 104. **Leitungswiderstand; Rheostat.** 1) Schaltet man in den Schließungsbogen einer Volta'schen Kette eine Tangentenbousole ein, um durch die Größe der Abweichung der Magnetnadel auf die Stärke des Stroms zu schließen, so findet man, daß die Abweichung der Nadel stets größer wird, so oft man den den Schließungsbogen bildenden Leiter verkürzt, daß diese Abweichung dagegen abnimmt, so oft man denselben verlängert, vorausgesetzt, daß alle übrigen Bedingungen, wie Stoff, Querschnitt, Temperatur, dieselben bleiben. 2) Schließt man dieselbe Kette einmal durch einen dünnen Draht, und das andere Mal durch einen ebenso langen dickeren Draht von demselben Stoffe, so wird die Tangentenbousole im letzteren Falle einen stärkeren Strom anzeigen, als in dem ersteren. 3) Schließt man die Kette nach einander das eine Mal durch einen Kupferdraht von bestimmter Länge und Dicke, und das andere Mal durch einen Draht von einem anderen Metall, z. B. von Messing, der aber mit dem Kupferdraht ganz gleiche Länge und Dicke hat, so wird in beiden Fällen die Bousole wieder Ströme von verschiedener Stärke anzeigen, und zwar bei der Schließung durch den Kupferdraht einen stärkeren Strom, als bei der Schließung durch den Messingdraht. 4) Wenn man, nachdem man die durch eine Kette bewirkte Ablenkung der Magnetnadel bemerkt hat, die beiden Metallplatten der Kette weiter von einander entfernt, so daß eine längere Flüssigkeitsschicht zwischen dieselben zu stehen kommt, den Schließungsbogen aber ganz ungeändert läßt, so bemerkt man dessenungeachtet, daß die Nadel desto mehr zurückgeht, je weiter die Platten von einander entfernt worden sind. 5) Läßt man die Entfernung der Platten ungeändert, hebt sie aber mehr aus der Flüssigkeit heraus, oder, was dasselbe ist, senkt in die Flüssigkeit bei derselben Entfernung kleinere Platten von demselben Material ein, so zeigt die Nadel, vorausgesetzt, daß an dem

Digitized by Google

Schließungsbogen Nichts geändert wurde, durch ihren Rückgang ebenfalls ein Schwächerwerden des Stroms an.

Diese Versuche zeigen offenbar, daß die Strömung der Electricität gewisse Widerstände zu überwältigen hat, durch welche die Stärke derselben, d. h. die Electricitätsmenge, welche während einer gegebenen Zeit durch irgend einen Querschnitt des Schließungsbogens strömt, vermindert wird. Sie zeigen uns ferner, daß diese Widerstände zweierlei Art sind, nämlich Widerstände, welche der Strom im Schließungsbogen durch die Leiter, welche denselben bilden, erfährt (Versuch 1, 2 und 3), und Widerstände in der Kette selbst durch die flüssigen Leiter (Versuch 4 und 5). Aus dem ersten Versuch geht dann speciell hervor, daß unter sonst gleichen Umständen der Widerstand mit der Länge des schließenden Drahtes, und zwar, wie genauere Untersuchungen gezeigt haben, in grabem Verhältniß mit der Länge desselben wächst; aus dem zweiten Versuche, daß der Widerstand desto geringer wird, je größer der Querschnitt des Drahtes ist, und zwar im grade umgekehrten Verhältnisse; aus dem dritten, daß auf den Widerstand die materielle Beschaffenheit des schließenden Drahtes von wesentlichem Einfluß ist, daß also die verschiedenen Metalle in ihrer Leitungsfähigkeit für Electricität von einander sehr verschieden sind. Zugleich ist uns nun hier ein Mittel an die Hand gegeben, die Metalle in Beziehung auf ihre Leitungsfähigkeit numerisch mit einander zu vergleichen. Man braucht nämlich nur Drähte beider Metalle von gleicher Länge und gleicher Dicke nach einander in den Schließungsbogen zu bringen, zu sehen, durch welchen die Nadel am wenigsten abgelenkt wird, dann diesen so lange zu verkürzen, bis die Nadel ebenso stark abgelenkt wird, als durch den anderen Draht, und dann zu bestimmen, wie vielmal er jetzt kürzer ist, als der andere Draht. Die Zahl, welche man so erhält, zeigt an, wie vielmal das Metall, aus welchem der Draht gemacht ist, schlechter leitet, als das Metall, aus welchem der andere Draht gemacht ist. Solche Untersuchungen haben ergeben, daß nächst Silber Kupfer der beste Electricitätsleiter ist, weßhalb man auch in der Regel Kupfer als Schließungsdraht anwendet.

Aus dem vierten und fünften Versuch ersehen wir, daß auch bei den flüssigen Leitern die Größe des Widerstandes abhängt von der Länge und dem Querschnitte derselben. Auch für sie hat man gefunden, daß der Widerstand in grabem Verhältniß mit ihrer Länge und im umgekehrten mit ihrem Querschnitt wächst. Indem man die Leitungsfähigkeit der Flüssigkeiten auf ähnliche Weise, wie eben angegeben wurde, untersucht hat, hat sich herausgestellt, daß dieselbe derjenigen der Metalle im Allgemeinen sehr bedeutend nachsteht. So ist nach Lenz die Leitungsfähigkeit einer Kupfervitriollösung 6857500 mal kleiner, als die des Kupfers und nach Pouillet ist diejenige des Wassers noch 400 mal kleiner, als die der Kupfervitriollösung.

Bei Versuchen, wie sie in diesem Paragraphen erwähnt wurden, bedient man sich mit großem Vortheil eines von Wheatstone erfundenen Apparates, des Rheostaten (Stromstillsteller, ῥέος, Strom und ἵστημι, stelle fest). Mittelst desselben kann man den Leitungswiderstand im Schließungsbogen nach Belieben jeden Augenblick vermehren oder vermindern, ohne die Kette zu öffnen. Dadurch kann aber auch der andere, oft nicht minder wichtige Zweck erreicht werden, die Stärke eines galvanischen Stromes

Digitized by Google

dauernd gleichbleibend zu erhalten. Der Hauptbestandtheil desselben ist ein aus einer nichtleitenden Substanz (trocknes Holz, Alabaster) bestehender Cylinder, der um eine horizontale Axe gedreht werden kann, und in dessen Oberfläche ein enger Schraubengang eingeschnitten ist. In den Windungen dieses Schraubenganges befindet sich ein dünner Messing- oder Neusilberdraht. Die mechanische Vorrichtung ist so getroffen, daß, wenn der Draht in den Schließungsbogen eingeschaltet ist, der Strom mehr oder weniger Windungen des Drahtes durchlaufen muß, je nachdem der Cylinder um seine Axe nach der einen oder nach der anderen Seite öfter oder weniger oft gedreht wird. Zugleich läßt sich an einer Scale ablesen, durch wie viele Windungen des Drahts der Strom in jedem besonderen Fall hindurch geht.

§. 105. **Ohm'sches Gesetz.** Die Electricitätsmenge, welche während einer gegebenen Zeit durch irgend einen Querschnitt des Schließungsbogens strömt, d. h. die Stärke des electrischen Stromes, muß offenbar bedingt sein durch die Menge freier Electricität, welche die Kette in dieser Zeit liefert, oder von ihrer electromotorischen Kraft, und von der Größe des Widerstandes, welchen die strömende Electricität auf ihrem Wege findet; sie muß offenbar bei gleichem Widerstande in gradem Verhältniß mit der electromotorischen Kraft wachsen, und bei gleicher electromotorischer Kraft im umgekehrten Verhältniß mit dem Widerstande stehen. Sie läßt sich also, wenn die Stromstärke ausgedrückt wird durch S, die electromotorische Kraft durch E, und der Widerstand durch W, durch die Formel ausdrücken $S = \frac{E}{W}$. Diese Relation zwischen den 3 Größen S, E und W wurde zuerst (1827) von Ohm aufgestellt, und heißt nach ihm das Ohm'sche Gesetz. Da der Widerstand, wie wir im vorigen Paragraphen gesehen haben, ein doppelter ist, nämlich ein Widerstand in der Kette selbst und ein Widerstand in dem Schließungsbogen, so muß also W die Summe beider bezeichnen oder den Gesammtwiderstand. Nennen wir daher den Widerstand in der Kette W', und den im Schließungsbogen W'', so ist auch $S = \frac{E}{W' + W''}$. Es ist ferner in §. 93. bereits nachgewiesen worden, daß in vielen Ketten die Stärke des Stroms oft sehr bedeutend geschwächt wird dadurch, daß durch die Polarisation auch ein Strom in entgegengesetzter Richtung hervorgerufen wird. Daß in diesem Falle die Menge freier Electricität, welche die Kette ohne die Polarisation in einer gegebenen Zeit liefern würde, um so viel vermindert wird, als durch die durch die Polarisation entstandene Strömung entwickelt wird, ist einleuchtend, und es muß demnach, wenn man die letztere mit P bezeichnet, E — P statt E gesetzt werden, so daß eigentlich $S = \frac{E - P}{W' + W''}$ ist. Für constante Ketten ist, wie wir oben gesehen haben, $P = 0$. Wenden wir nun zunächst dieses Gesetz auf die aus mehreren einzelnen Ketten zusammengesetzten Batterien an, so kann es ganz unverändert beibehalten werden, wenn man sich unter E jetzt nur die Summe der electromotorischen Kräfte in den einzelnen Ketten, und ebenso unter W' die Summe der Leitungswiderstände in den einzelnen Ketten denkt. In der Regel werden aber ganz gleich construirte Ketten zu einer Batterie combinirt, es ist dann also sowohl E, als auch

Digitized by Google

W' in ihrer ersten Bedeutung in jeder Kette gleich, und man hat demnach, wenn die Batterie aus n einzelnen Elementen oder Ketten besteht, $S = \frac{nE}{nW' + W''}$. Wenn nun die Batterie im Schließungsbogen einen sehr geringen Widerstand findet (also z. B. durch einen sehr kurzen und dicken Kupferdraht geschlossen ist), so kann W'' gegen nW' verschwindend klein sein, folglich unberücksichtigt bleiben, und es wäre $S = \frac{nE}{nW'} = \frac{E}{W'}$, also die Stärke des Stromes nicht größer, als die der einfachen Kette, und die Anwendung einer Batterie würde demnach gar keinen Vortheil bieten. Ist aber W'' bedeutend (durchläuft z. B. der Strom, wie bei den electrischen Telegraphen, sehr lange Drahtleitungen, oder sind, wie bei den chemischen Zersetzungen, Flüssigkeiten in den Schließungsbogen eingeschaltet), dann ist allerdings der Quotient $\frac{nE}{nW' + W''}$ größer, als $\frac{E}{W' + W''}$, weil wohl der Dividend, aber nicht ebenso auch der Divisor nmal größer geworden ist. In solchen Fällen wird man also der Batterie vor der einfachen Kette den Vorzug zu geben haben. Sehen wir nun noch zu, ob man nicht auch statt der Batterie eine recht großplattige Kette verwenden könne. Da die electromotorische Kraft, wie wir in §. 80 gesehen haben, nicht von der Masse der Erreger oder von der Menge ihrer Berührungspunkte, sondern nur von ihrer materiellen Beschaffenheit abhängt, so ist E in einer großplattigen Kette nicht größer, als in einer kleinplattigen, der flüssige Leiter aber erhält zwischen großen Platten einen größeren Querschnitt, und mithin wird W' um so kleiner, je größer die Platten. Gesetzt man nehme q mal größere Platten, so wird W' q mal kleiner, und es ist $S = \frac{E}{\frac{W'}{q} + W''} = \frac{E}{\frac{W' + qW''}{q}} = \frac{qE}{W' + qW''}$. War nun, wie wir zuletzt angenommen haben, W'' für sich schon sehr groß, so kann um so mehr W' gegen qW'' unberücksichtigt bleiben, so daß man $S = \frac{qE}{qW''} = \frac{E}{W''}$ setzen darf. Hieraus ist ersichtlich, daß für einen sehr großen Leitungswiderstand im Schließungsbogen eine großplattige Kette vor einer anderen fast gar keine Vortheile bietet. Ist dagegen W'' nur sehr klein im Verhältniß zu W', dann ist allerdings der Quotient $\frac{qE}{W' + qW''}$ wieder beträchtlich größer, als $\frac{E}{W' + W''}$, und demnach eine großplattige Kette mit Vortheil zu verwenden.

§. 106. **Fortsetzung; specifischer Leitungswiderstand.** Um die verschiedenen Widerstände mit einander vergleichen zu können, nimmt man in der Regel den Widerstand eines Kupferdrahts von der Länge 1 und dem Querschnitt 1 als 1 an, und nennt diesen den specifischen Leitungswiderstand. Wie man nun die Leitungswiderstände aller übrigen Drähte auf diese Einheit reduciren könne, ist schon §. 104 angedeutet. Aber auch

Digitized by Google

der Leitungswiderstand in der Kette selbst muß in dieser Einheit ausgedrückt werden. Es kann dies auf folgende Weise geschehen. Man schließe eine Kette zuerst unmittelbar durch eine Tangentenbouſſole (der Widerstand derselben kann als sehr gering unberücksichtigt bleiben), und beobachte den Ablenkungswinkel der Nadel. Dann schalte man in den Schließungsbogen einen m Meter langen Kupferdraht von bekannter Dicke ein, und beobachte abermals den Ablenkungswinkel der Nadel. Gesetzt man habe im ersten Fall eine Ablenkung von α^0 und im zweiten von β^0 erhalten. Gesetzt man nun den Widerstand des flüssigen Leiters demjenigen eines x Meter langen Kupferdrahts von derselben Dicke, wie der angewandte, gleich, so ist im ersten Fall der Gesammtwiderstand x und im zweiten $x + m$. Die Stromstärken in beiden Fällen verhalten sich wie $\text{tang.}\alpha : \text{tang.}\beta$. Da aber die electromotorische Kraft sich gleich bleibt, so müssen sich die Stromstärken umgekehrt wie die Widerstände verhalten, folglich ist $x : x + m = \text{tang.}\beta : \text{tang.}\alpha$, $x \times \text{tang.}\alpha = x \times \text{tang.}\beta + m \times \text{tang.}\beta$, $x(\text{tang.}\alpha - \text{tang.}\beta) = m \times \text{tang.}\beta$ und $x = \frac{m \,.\, \text{tang.}\beta}{\text{tang.}\alpha - \text{tang.}\beta}$. Das gefundene x zeigt, einem wie langen Kupferdraht von der angewandten Dicke der Leitungswiderstand der Flüssigkeit gleich gesetzt werden kann. War der Querschnitt des Kupferdrahts nicht $= 1$, sondern $= q$, so muß offenbar x noch durch q dividirt werden.

Durch das Ohm'sche Gesetz haben wir aber auch ein Mittel, die electromotorische Kraft einer Kette numerisch bestimmen zu können. Wir wollen zu diesem Zwecke die eben beschriebenen Versuche wieder zu Grunde legen, dann ist $\text{tang.}\alpha = \frac{E}{x}$ und $\text{tang.}\beta = \frac{E}{x+m}$, also $x = \frac{E}{\text{tang.}\alpha}$ und $x + m = \frac{E}{\text{tang.}\beta}$. Substituirt man den Werth für x in die letztere Gleichung, so ist $\frac{E}{\text{tang.}\alpha} + m = \frac{E}{\text{tang.}\beta}$, $m = \frac{E}{\text{tang.}\beta} - \frac{E}{\text{tang.}\alpha}$ $= E\left(\frac{1}{\text{tang.}\beta} - \frac{1}{\text{tang.}\alpha}\right) = E \times \frac{\text{tang.}\alpha - \text{tang.}\beta}{\text{tang.}\alpha \times \text{tang.}\beta}$, folglich $E = \frac{\text{tang.}\alpha \,.\, \text{tang.}\beta}{\text{tang.}\alpha - \text{tang.}\beta} \cdot m$.

Drittes Kapitel.

Von der Inductionselectricität.

§. 107. **Erregung eines electrischen Stromes durch einen electrischen Strom.** 1) Man stelle 2 Drahtspiralen, deren Kupferdraht mit Seide übersponnen ist, damit die einzelnen Windungen von einander isolirt sind, nahe bei einander auf, verbinde die Enden der einen mit dem Galvanometer, und die Enden der anderen mit den Polen einer galvanischen Kette oder Batterie, so wird man bemerken, daß in dem Momente, in welchem die Kette geschlossen wird, die Nadel abweicht, jedoch nach wenigen Schwankungen bald wieder in ihre Ruhelage zurückgeht, und nicht von Neuem abgelenkt wird, die Kette mag noch so lange geschlossen bleiben. Am besten ist es, wenn die Spiralen so beschaffen sind, daß die eine in die andere

Digitized by Google

geschoben werden kann. 2) In dem Augenblicke aber, in welchem die Kette dann geöffnet wird, beobachtet man abermals eine Ablenkung der Nadel, und zwar jetzt nach der entgegengesetzten Seite. 3) Hatte man entfernt von der ersten Spirale durch die zweite die Kette geschlossen, und bringt sie nun der ersten Spirale nahe, so wird die Nadel ebenfalls abgelenkt, und gelangt nach wenigen Schwingungen wieder in ihre Ruhelage. 4) Sie verläßt diese jedoch wieder, und weicht dann nach der entgegengesetzten Seite aus, wenn der geschlossene Strom wieder aus der Nähe der Spirale entfernt wird.

Die Ablenkung der Nadel kann in diesen vier Versuchen nur die Folge eines in der Spirale, welche mit dem Galvanometer verbunden ist, circulirenden Stromes sein. Dieser Strom kann, weil die Nadel ihre Ablenkung nicht beibehält, sondern immer wieder in ihre Ruhelage zurückkehrt, nur ein momentaner sein; hervorgebracht kann er aber nur sein durch den Strom in der anderen Spirale, welche die Kette schließt. Wir lernen also aus dem ersten und zweiten Versuch, daß jeder electrische Strom sowohl im Augenblicke seines Entstehens, als auch im Augenblicke seines Verschwindens in einem benachbarten Electricitätsleiter einen Strom hervorruft, und aus dem dritten und vierten Versuch, daß, wenn ein Leiter, in welchem bereits ein Strom vorhanden ist, einem anderen Leiter rasch genähert, oder plötzlich aus der Nähe des anderen Leiters entfernt wird, in diesem ebenfalls ein electrischer Strom entsteht. Versuchen wir nun, aus der Ablenkung der Nadel die Richtung des Stromes in der Spirale, welche mit dem Galvanometer verbunden ist, zu bestimmen, und vergleichen damit die Richtung, welche der Strom der Kette in der anderen Spirale hat, so ergibt sich, daß in dem ersten und dritten Versuche beide Ströme entgegengesetzt gerichtet sind, woraus dann schon aus den Versuchen selbst folgt, daß sie in dem zweiten und vierten Versuch einerlei Richtung haben. Wir können also die obigen Sätze jetzt noch genauer so bestimmen: Wenn in der Nähe eines Electricitätsleiters ein Strom geschlossen wird, oder wenn der Leiter einem schon geschlossenen Strome rasch genähert wird, so erregt er in dem Leiter einen momentanen Strom nach entgegengesetzter Richtung; wenn aber in der Nähe eines Leiters ein Strom geöffnet wird, oder wenn aus der Nähe des Leiters ein schon geschlossener Strom rasch entfernt wird, so ruft er in dem Leiter einen momentanen Strom nach derselben Richtung hervor. Die Entdeckung dieser wichtigen Thatsachen verdanken wir Faraday, der sie im Jahre 1831 zuerst veröffentlichte. Nach ihm nennt man diese neuen Ströme, welche in den Leitern durch die vertheilende Wirkung anderer Ströme hervorgebracht werden, Inductionsströme (inducõre, ableiten, veranlassen), denjenigen, welcher den anderen hervorruft, nennt man auch den inducirenden oder primären oder Hauptstrom, und den anderen den inducirten oder secundären oder Nebenstrom. Man kann die inducirten Ströme nach Fechner als Vertheilungsphänomene ansehen. In dem Leiter, in welchem der Strom inducirt werden soll, sind beide Electricitäten, die positive und negative, in allen Theilchen mit einander verbunden (der Leiter ist in dem unelectrischen Zustande). Dadurch nun, daß in seiner Nähe ein electrischer Strom auf ihn einzuwirken be-

Digitized by Google

ginnt, werden die beiden Electricitäten vertheilt, und zwar wird die gleichartige Electricität nach entgegengesetzter Richtung, die ungleichartige aber nach gleicher Richtung in Bewegung gesetzt. Der Nebenstrom hat also in diesem Falle die entgegengesetzte Richtung, wie der Hauptstrom. Dauert dann die Einwirkung des Stromes auf den Leiter fort, so werden dadurch die einmal getrennten Electricitäten auch getrennt erhalten. Es kann also von einer Strömung nicht weiter die Rede sein, und dadurch erklärt sich die momentane Dauer des Nebenstromes. Wird endlich die Einwirkung des Stromes aufgehoben, sei es dadurch, daß man die Kette öffnet, oder daß man den Strom von dem Leiter entfernt, so suchen die beiden getrennten Electricitäten im Leiter sich wieder mit einander zu vereinigen, und gehen demnach auf dem Wege wieder zurück, auf welchem sie sich getrennt hatten. Dadurch erhält dann der Nebenstrom dieselbe Richtung, wie der Hauptstrom. Auch jetzt muß der Strom natürlich verschwinden, sobald die Ausgleichung stattgefunden hat.

Henry hat (1842) gezeigt, daß ein inducirter Strom selbst wieder einen anderen induciren könne. Man spricht daher jetzt auch von Inductionsströmen verschiedener Ordnungen. Der secundäre Strom heißt dann der Strom zweiter Ordnung, und wenn durch denselben ein anderer Strom inducirt wird, so ist dieses der Strom dritter Ordnung u. s. w. Henry ist es gelungen, Inductionsströme fünfter Ordnung hervorzurufen.

§. 108. **Fortsetzung; Wirkungen des Nebenstroms.** 1) Wenn man die Drahtenden einer Spirale, in welcher ein Strom inducirt werden soll, ganz nahe zusammenbringt, so sieht man, so oft der inducirende Strom geschlossen oder geöffnet wird, einen Funken überspringen. 2) Befestigt man an den Drahtenden die in §. 87 erwähnten, größeren cylindrischen Metallstücke, und faßt diese mit benetzten Händen an, so empfindet man, so oft der secundäre Strom auftritt, eine ziemlich heftige Erschütterung. 3) Bringt man in die als secundärer Leiter dienende Spirale eine Stahlnadel, ehe der Hauptstrom geschlossen wird, oder legt man die Nadel in die Spirale, nachdem der Hauptstrom geschlossen ist, und nimmt sie erst heraus, nachdem er wieder geöffnet wurde, so findet man in beiden Fällen, daß die Nadel magnetisch geworden ist.

Wir sehen hier, daß der Nebenstrom sich nicht nur dadurch kund gibt, daß er ablenkend auf eine Magnetnadel einwirkt, sondern daß er auch andere Wirkungen des galvanischen Stromes zeigt. In unseren Versuchen ist eine thermische, eine physiologische und eine magnetische nachgewiesen. Daß er keine großen chemischen Wirkungen hervorbringen kann, erklärt sich durch seine nur momentane Dauer. Auffallend stark dagegen sind seine physiologischen Wirkungen. Während man von einer Batterie von 4, 6, ja 8 Elementen einen Erschütterungsschlag nicht empfindet, kann hier der Hauptstrom von einer einfachen Kette herrühren, und doch wird die Inductionsspirale sehr fühlbare Schläge ertheilen. Der Grund dieser Erscheinung wird sich später noch herausstellen. Hätte man im dritten Versuch die Nadel vor dem Schließen des Hauptstromes eingelegt, und nach dem Oeffnen desselben wieder herausgenommen, so würde der Versuch nicht gelungen sein, und zwar deßwegen, weil der Nebenstrom beim Schließen die entgegengesetzte Richtung hat, wie beim Oeffnen, weil also seine Wirkung beim Schließen durch diejenige beim Oeffnen wieder aufgehoben worden sein würde.

Digitized by Google

Der bei dem Oeffnen des Hauptſtroms entſtehende Nebenſtrom müßte erſt die Polarität der Nadel, die ſie bei dem Schließen des Hauptſtroms erhalten hat, wieder vernichten, ehe er ihr die ſeiner Richtung entſprechende Polarität ertheilen könnte.

§. 109. **Extraſtrom oder Gegenſtrom.** Wenn man eine einfache Kette durch einen kurzen Draht ſchließt, ſo erhält man ſowohl beim Schließen, wie auch beim Oeffnen nur einen ganz ſchwachen Funken. Wenn man aber als Schließungsleiter eine aus vielen Windungen beſtehende Drahtſpirale benutzt, ſo gewahrt man beim Oeffnen der Kette einen ſehr lebhaften Funken im Vergleich zu demjenigen, welcher beim Schließen auftritt, und wenn man zugleich beim Oeffnen die beiden Drahtenden mit benetzten Fingern anfaßt, ſo fühlt man auch einen Erſchütterungsſchlag, während doch die einfache Kette, auf die gewöhnliche Weiſe geſchloſſen, keine Spur eines Erſchütterungsſchlages gibt.

Wir ſehen alſo hier dadurch, daß der Leitungswiderſtand der Kette vermehrt wird, doch größere Wirkungen durch dieſelbe hervorgebracht werden, wir ſehen aber auch, daß dieſe größeren Wirkungen nicht beim Schließen, wohl aber beim Oeffnen der Kette auftreten. Auch dieſe auffallenden Erſcheinungen wurden zuerſt von Faraday beobachtet. Erklärt hat er dieſelben dadurch, daß er annahm, die Windungen einer und derſelben Drahtſpirale übten auch auf einander eine inducirende Wirkung aus, ſo daß in derſelben Spirale zu gleicher Zeit ein Haupt- und ein Nebenſtrom circulirten. Da nun beim Schließen der Kette der Nebenſtrom die entgegengeſetzte Richtung von dem Hauptſtrome hat, ſo kann offenbar keine verſtärkte Wirkung eintreten, wohl aber muß dies geſchehen bei dem Oeffnen der Kette, wo beide Ströme einerlei Richtung haben. Der beobachtete Erſchütterungsſchlag wäre dann vorzugsweiſe auf Rechnung des Nebenſtromes zu ſetzen. Dem Nebenſtrome, welcher in demſelben Leiter, wie der Hauptſtrom auftritt, hat Faraday den Namen Extraſtrom beigelegt, Dove aber, der, ſowie Edlund, in der neueſten Zeit die wirkliche Exiſtenz deſſelben nachgewieſen hat, nennt ihn Gegenſtrom.

§. 110. **Erregung electriſcher Ströme durch Magnete.** 1) Wenn man in eine Drahtſpirale, deren Enden mit einem ziemlich entfernten Multiplicator verbunden ſind, einen Magnetſtab, der für ſich in dieſer Entfernung nicht auf die Nadel des Multiplicators wirkt, einſteckt, ſo beobachtet man in demſelben Augenblicke eine Ablenkung der Multiplicatornadel. Die Nadel geht aber nach wenigen Schwingungen wieder zurück. Entfernt man dann den Magnetſtab wieder raſch aus der Spirale, ſo wird die Nadel abermals und zwar jetzt nach der entgegengeſetzten Richtung abgelenkt. 2) Ganz ähnliche Erſcheinungen zeigen ſich, wenn man in die Höhlung der Spirale einen Stab von weichem Eiſen bringt, und ein Ende deſſelben mit einem Pole eines kräftigen Magnets berührt. Die Ablenkungen der Nadel erfolgen in dem Momente der Berührung, und in dem Momente, in welchem dieſe wieder aufgehoben wird. Dieſer Verſuch wird gewöhnlich auch ſo abgeändert, daß man einen hufeiſenförmig gebogenen Cylinder von weichem Eiſen nimmt, deſſen Schenkel mit einem mit Seide umſponnenen Kupferdraht in vielen Windungen ſo umwunden ſind, daß ein durch den Draht gehender Strom an den beiden Enden des Hufeiſens entgegengeſetzte Pole hervorrufen würde. Die Enden des Drahtes

Digitized by Google

werden wieder mit einem entfernten Multiplicator verbunden. Wenn man dann einen kräftigen Magnet, der ebenfalls hufeisenförmig gebogen ist, und zwar so, daß die Pole desselben auf die Enden des Hufeisens aus weichem Eisen passen, den Enden des weichen Eisens nähert, so wird die Nadel abgelenkt, und ebenso, wenn man ihn wieder entfernt, nur geschieht im letzteren Falle die Ablenkung nach entgegengesetzter Richtung. 3) Man nehme einen Stab von weichem Eisen, der mit einer Spirale von Kupferdraht umgeben ist, deren beide Enden mit einem Multiplicator verbunden sind, man bringe den Stab in die Richtung der Inclinationsnadel, und drehe ihn dann rasch im magnetischen Meridian um, so daß das obere Ende unten, das untere oben hinkommt, so beobachtet man an der Nadel einen Ausschlag von einigen Graden, sie kehrt aber bald wieder auf Null zurück. Dreht man dann den Stab abermals um, so erfolgt ein Ausschlag nach der entgegengesetzten Richtung.

Fig. 18.

4) Ein etwas langer Kupferdraht (8 bis 10 Fuß lang) wird rechtwinklich umgebogen, die Enden a und f (Fig. 18) werden mit dem Multiplicator M verbunden, das Ganze wird so aufgestellt, daß die Ebene des Drahts von Ost nach West gerichtet ist, und daß der ganze Draht um be als horizontale Are gedreht werden kann. Wird dann cd rasch von Nord nach Süd gedreht, so ersieht man aus der Ablenkung der Galvanometernadel, daß in dem Drahte ein Strom circulirt; dreht man aber cd von Süd nach Nord, so weicht die Nadel nach der entgegengesetzten Seite aus. Stärkere Wirkungen erhält man, wenn man statt des einfachen Drahtes um einen ziemlich großen Holzrahmen einen Draht in mehreren Windungen aufwindet, die Enden desselben mit einem Galvanometer verbindet, den Rahmen dem magnetischen Meridian parallel hält, und ihn dann rasch um eine horizontale Seite dreht. Auch hier ist die Ablenkung der Nadel verschieden gerichtet, je nachdem der Rahmen nach der einen oder nach der anderen Seite gedreht wird.

Nachdem Faraday die Inducirung eines Stromes durch einen electrischen Strom entdeckt hatte, mußte er bei der großen Aehnlichkeit zwischen der Wirkung der Magnete und der Solenoïde in den Erscheinungen, welche auf der Anziehung und Abstoßung electrischer Ströme beruhen, auf die Vermuthung kommen, daß auch bei der Induction der inducirende Strom durch einen Magnet vertreten werden könne. Unsere Versuche beweisen, daß es ihm auch gelungen ist, die Wahrheit seiner Vermuthung durch die Erfahrung nachzuweisen, sie zeigen, daß sowohl der Magnetismus eines Stahlmagnets (Versuch 1), als auch der in einem weichen Eisen durch Vertheilung hervorgerufene Magnetismus (Versuch 2), als auch endlich der Erdmagnetismus (Versuch 3 und 4) in einem electrischen Leiter einen momentanen Strom hervorrufen könne. Man hat daher diesen von Faraday entdeckten Strömen den Namen magneto-electrische Ströme beigelegt.

Gehen wir nun auf die einzelnen Versuche etwas näher ein, und **bestimmen wir zunächst im ersten Versuche aus der Ablenkung der Nadel die Richtung des Stroms in der Spirale, so findet man stets, daß der Strom, welcher bei der Annäherung des Magnets auftritt, mit den Strö-**

Digitized by Google

men, von welchen wir uns nach der Ampère'schen Theorie den Magnet umkreist denken, eine entgegengesetzte Richtung hat, daß dagegen der Strom, welcher bei der Entfernung des Magnets circulirt, mit den den Magnet umkreisenden Strömen gleichgerichtet ist, also in dieser Hinsicht eine vollständige Uebereinstimmung mit den Erscheinungen, wie sie bei der Induction durch Annäherung oder Entfernung eines electrischen Stromes beobachtet werden. Diese Uebereinstimmung zeigt sich auch in dem zweiten Versuche, der offenbar dem Falle in §. 107 entspricht, in welchem der inducirte Strom durch das Schließen oder Oeffnen einer der Inductionsspirale nahen Kette hervorgerufen wird, da auch hier die Ströme, welche das weiche Eisen umkreisen, erst hervorgerufen werden, und wieder verschwinden, je nachdem dasselbe der Einwirkung des Magnets ausgesetzt oder wieder entzogen wird. Der dritte Versuch kann, streng genommen, nicht als Beweis gelten, daß auch durch den Erdmagnetismus electrische Ströme inducirt werden können, sondern fällt mehr mit dem zweiten Versuche zusammen, von welchem er sich nur dadurch unterscheidet, daß in dem weichen Eisen der Magnetismus nicht durch die Einwirkung eines Stahlmagnets, sondern den Erdmagnetismus hervorgerufen wird. Dagegen wird dieser Beweis vollständig durch den vierten Versuch geliefert, da in demselben gar kein Eisen in Anwendung kommt. Suchen wir wieder aus der Ablenkung der Nadel die Richtung des Stroms in dem Drahte abcdef zu bestimmen, so geht er bei der Drehung des Theils cd von Nord nach Süd so durch den Draht, daß er in cd von West nach Ost gerichtet ist, dagegen bei der Drehung von Süd nach Nord von Ost nach West. Zur Erklärung des Erdmagnetismus wird, wie wir in §. 113 gesehen haben, nach der Ampère'schen Theorie angenommen, daß die Erde von electrischen Strömen in der Richtung von Ost nach West umkreist sei. Die Wirkung aller dieser Ströme können wir uns aber in einen einzigen Strom vereinigt denken, der den magnetischen Aequator in der angegebenen Richtung umströmt. Da der magnetische Aequator südlich von uns liegt, so ist also eine Drehung von cd von Nord nach Süd gleichbedeutend mit einer Annäherung desselben an den Erdstrom und eine Drehung von Süd nach Nord gleichbedeutend mit einer Entfernung desselben von dem Erdstrom. Deßwegen ist auch bei der ersten Drehung die Richtung des inducirten Stromes derjenigen des Erdstromes entgegengesetzt, bei der zweiten Drehung aber mit derselben übereinstimmend, wie auch nach dem dritten und vierten Versuch in §. 107 erwartet werden muß. Der Unterschied zwischen den Versuchen in §. 107 und den gegenwärtigen besteht nur darin, daß dort der inducirende Strom dem Leiter, hier aber der Leiter dem inducirenden Strome genähert wird. Die Erfahrung lehrt jedoch, daß sowohl jene Versuche, als auch der erste Versuch in unserem Paragraph auch so abgeändert werden können, daß unbeschadet der Wirkungen der Draht, in welchem der Strom inducirt werden soll, dem inducirenden Strome oder dem Magnete genähert oder von demselben entfernt wird. Lenz, der früher schon mit Jacobi die Gesetze aufgestellt hatte, nach welchen sich die Stärke des Magnetismus, welcher durch einen electrischen Strom im weichen Eisen hervorgerufen wird, richtet (§. 100), hat auch diejenigen Gesetze zu ermitteln gesucht, durch welche die Stärke der magneto-electrischen Inductionsströme bestimmt wird. Die Resultate, zu welchen er gekommen

Digitized by Google

ist, sind den früheren ganz analog. Es ist nämlich die electromotorische Kraft einer inducirten Spirale gleich der Summe der electromotorischen Kräfte der einzelnen Windungen, also bei sonst gleichen Bedingungen der Anzahl der Windungen proportional. Dagegen äußert sowohl die Weite der Windungen, als auch die Dicke des Drahts fast gar keinen Einfluß auf dieselbe.

§. 111. **Fortsetzung; Neeff'scher Apparat.** Die Erfahrung lehrt, daß die Wirkungen einer Inductionsspirale sehr bedeutend verstärkt werden, wenn man in dieselbe einen Stab von weichem Eisen einstreckt.

Der Grund dieser Erscheinung wird uns durch den vorhergehenden Paragraph klar werden. In dem Augenblicke nämlich, in welchem der Hauptstrom geschlossen wird, wird nicht nur der Inductionsstrom hervorgerufen, sondern auch das Eisen zu einem Electromagnete, den wir uns von electrischen Strömen umflossen zu denken haben, welche in ihrer Richtung mit der Richtung des Hauptstroms übereinstimmen. Auch der Electromagnet wirkt inducirend auf die Inductionsspirale, und ruft in derselben einen Strom von entgegengesetzter Richtung hervor, also einen Strom, der in seiner Richtung mit dem durch die Kette inducirten Strome übereinstimmt, und diesen folglich verstärkt. Beim Oeffnen des Hauptstromes verschwindet der Magnetismus des Electromagnets, und dadurch wird in der Inductionsspirale ein Strom erzeugt, der mit den Strömen, von welchen wir uns den Electromagnet umgeben dachten, einerlei Richtung hat; ein eben solcher wird aber auch durch die Kette hervorgerufen, beide müssen sich also als gleichgerichtet abermals verstärken. Aus denselben Gründen verstärkt die Einführung eines weichen Eisenstabes ebenso auch die Wirkungen des Extrastroms. Noch bedeutender aber ist in beiden Fällen die Verstärkung der Wirkungen, wenn statt des Eisenstabes ein Bündel von Eisendrähten, in welchem die einzelnen Drähte von einander isolirt sind, angewandt wird. Auch hiefür hat Magnus die Erklärung gefunden. Er fand nämlich, daß, wenn er das Drahtbündel in einen dünnen Cylinder von Eisenblech einschloß, keine Verstärkung eintrat, wohl aber wieder, als er dann diesen Cylinder der Länge nach aufschlitzte. Nun weiß man aber durch andere Untersuchungen, daß die Stärke des inducirten Stromes nicht vermindert wird, wenn ein an beiden Enden offener Draht zwischen ihn und den inducirenden Draht gelegt wird, daß er dagegen wirklich geschwächt wird, wenn der dazwischen gelegte Draht in sich geschlossen ist, da im letzteren Fall durch den Hauptstrom auch in diesem Drahte ein Strom inducirt, und dadurch seine inducirende Wirkung getheilt wird. Der Eisenblechcylinder ist nun ein solcher in sich geschlossener Draht, aufgeschlitzt dagegen wirkt er wie der an beiden Enden offene Draht. Daß diese Annahme richtig ist, geht auch daraus hervor, daß, wie Dove gefunden hat, die Wirkung eines Drahtbündels, wenn man dasselbe in einen hohlen Cylinder von einem anderen Metall einschließt, um so mehr geschwächt wird, je besser das Metall die Electricität leitet. Der massive Eisenstab ist nun nach Magnus einem Drahtbündel, das in einen Eisenblechcylinder eingeschlossen ist, vergleichbar, indem auch bei ihm der Magnetismus nicht nur in der Spirale, sondern auch in dem Eisen des Stabes selbst einen Strom erregt.

Digitized by Google

Eine interessante Anwendung hat das Einsetzen eines Eisenstabs oder eines Drahtbündels in eine Inductionsspirale in dem Neeff'schen Apparate gefunden, in welchem sie nicht nur eine Verstärkung des Nebenstroms bewirken, sondern zugleich für ein rasch auf einander folgendes Schließen und Oeffnen der Kette zu sorgen haben.

Fig. 19.

Um die beiden Spiralen möglichst nahe an einander zu bringen, sind beide auf einer und derselben Holzspule aufgewickelt, so daß immer neben einer Windung des einen Drahts eine Windung des anderen herläuft. Um aber doch die Drähte von einander unterscheiden zu können, sind sie in der Regel mit verschiedenfarbiger Seide übersponnen. Die Spule ruht auf drei verticalen Säulchen von Holz, von welchen hier (Fig. 19) nur zwei gezeichnet sind. In der Oeffnung der Spule steckt der Drahtbündel a. Die Verbindung der galvanischen Säule mit der inducirenden Spirale wird nun auf folgende Weise hergestellt. Um das obere Ende des einen Holzsäulchens ist ein Metallring b gelegt, mit welchem das eine Ende der inducirenden Spirale in leitende Verbindung gebracht wird, und an welchem zugleich ein Kupferdraht cd befestigt ist, welcher dicht unter der Mitte der Spule horizontal hinläuft, dann am anderen Ende nach Unten umgebogen ist, und in ein Platincylinderchen e, den Hammer, endigt. Unter diesem Draht und parallel mit ihm läuft ein anderer, etwas platt geklopfter Kupferdraht fg, auf welchem gerade unter dem Hammer ein Platinplättchen h, der Amboß, aufgelöthet ist, in solcher Entfernung, daß der Hammer gerade mit dem Amboß in Berührung kommt. Dieser Draht ist mit seinem einen Ende g auf dem Fußbrett der Säulchen befestigt, und wird dort mit dem einen Pole der galvanischen Säule leitend verbunden, während der andere Pol mit dem zweiten Drahtende der Inductionsspirale verbunden wird. Da, wo der erste Draht unter dem Drahtbündel herläuft, ist an demselben auch noch ein horizontales Eisenplättchen i befestigt. Gesetzt g sei mit dem positiven Pole, und das eine Drahtende der Inductionsspirale mit dem negativen Pole verbunden, so geht der Strom von dem positiven Pole nach g, h, e, d, c, b, dann durch die Inductionsspirale und zurück zu dem negativen Pole der Säule. Sobald aber der Strom circulirt, wird a zum Electromagnet, und zieht seinen Anker i an. Dadurch wird aber der Hammer e von dem Amboß h aufgehoben, und der Strom unterbrochen. Nun fällt i wieder nieder und e kommt wieder mit h in Berührung, der Strom wird abermals geschlossen, und so geht es in schneller Aufeinanderfolge immer fort. Der Apparat ist vorzugsweise für die physiologischen Wirkungen zu medicinischen Zwecken construirt, und dazu auch wegen seiner kräftigen Wirkungen und der raschen Aufeinanderfolge der Erschütterungsschläge ganz besonders geeignet. Da der Extrastrom zu physiologischen Wirkungen ebenso geeignet ist, wie der Nebenstrom, so hat man in neuerer Zeit den Apparat dadurch vereinfacht, daß man nur eine Drahtspirale anwendet, an welcher

Digitized by Google

dann, um den Extrastrom wirken zu lassen, eine Nebenschließung angebracht wird, in welcher man den menschlichen Körper einschaltet.

§. 112. **Magneto-electrische Rotationsmaschinen.** Um nachzuweisen, daß auch der magnet-electrische Strom alle die verschiedenen Wirkungen hervorzubringen vermöge, wie der gewöhnliche galvanische Strom, hat man die magneto-electrischen Rotationsmaschinen construirt. Es würde dem Zwecke dieses Buches nicht entsprechen, hier alle die verschiedenen Constructionen derselben, die sie durch Pixii, Sarton, Clarke, Ettingshausen, Petrina und Stöhrer erhalten haben, näher zu erläutern, sondern es muß genügen, das Princip, auf welchem sie beruhen, auseinander zu setzen.

Fig. 20.

Es sei N (Fig. 20) der Nordpol, S der Südpol eines sehr wirksamen, festliegenden, aus mehreren Lamellen bestehenden Hufeisenmagnets, A und B seien zwei Cylinder von weichem Eisen, welche auf einer Eisenplatte, deren Mitte auf einer eisernen Axe D aufsitzt, befestigt sind. Um beide sei ein sehr langer Draht in vielen Windungen spiralförmig aufgewunden, r und s seien die beiden Enden des Drahtes. A und B mit ihren Drahtspiralen lassen sich um die Axe D so drehen, daß sie sich möglichst nahe über die Pole N und S hinbewegen. Gesetzt A bewege sich gerade nach N und B nach S, so wird das Ende von A, welches über N hingleitet, ein Südpol, und das Ende von B, welches über S hingleitet, ein Nordpol. Da also diese Pole die von uns abgewandten Enden von A und B sind, so gehen die Ströme um A und B in derselben Richtung, wie sie durch die Pfeile um N und S angedeutet ist. Der in A und B hervorgerufene Magnetismus inducirt nun in den Spiralen, welche A und B umgeben, einen Nebenstrom, dessen Richtung der Richtung derjenigen Ströme, von welchen wir A und B umkreist denken, entgegengesetzt ist; durch den Draht geht also der Strom in der Richtung der Pfeile von s durch t und u nach r. Bei weiterer Drehung entfernt sich A von N nach A′, und B von S nach B′. Der Magnetismus in A und B verschwindet wieder, und ruft dadurch in den Spiralen einen entgegengesetzt gerichteten Strom hervor, der demnach jetzt von r durch u und t nach s geht. Wird die Drehung noch weiter fortgesetzt, so kommt B über N und A über S. Der Magnetismus in A und B ist zwar jetzt der entgegengesetzte gegen den früheren, aber die Enden r und s liegen jetzt auch auf der entgegengesetzten Seite der Axe D, der Strom geht deßwegen wieder von s durch t und u nach r. So geht es fort. Bei jeder halben Umdrehung wird die Richtung des Stroms in den Spiralen in die entgegengesetzte verwandelt. **Bei sehr rascher Umdrehung wird die Unterbrechung des Nebenstroms ganz unmerklich, und man erhält einen ununterbrochenen Strom bald nach der einen, bald nach der anderen Richtung. Will man**

Digitized by Google

die Wirkung dieſes Stromes auf einen Körper unterſuchen, ſo muß man denſelben zwiſchen r und s einſchalten, und dadurch den Draht der Spiralen ſchließen. Man kann nun die Inductionsſtröme, grade wie ſie entſtehen, alſo mit ſtets wechſelnden Richtungen durch den Körper gehen laſſen (phyſiologiſche Wirkungen), oder, wenn dies die beabſichtigte Wirkſamkeit auf den Körper beeinträchtigte, ſie durch Anwendung eines Stromwechslers (Commutators)*) auf einerlei Richtung zurückführen, oder auch immer nur einen Strom wirkſam werden laſſen durch eine Vorrichtung, welche bewirkt, daß in dem Augenblicke, in welchem der entgegengeſetzte Strom eintreten ſollte, die Schließung des Spiraldrahtes unterbrochen wird, und ſo lange unterbrochen bleibt, bis wieder der andere Strom eintritt.

Wir haben ſchon oben geſehen, daß es bei einigen Wirkungen des electriſchen Stromes mehr auf die Menge der in einer gegebenen Zeit durch einen Körper ſtrömenden Electricität, bei anderen dagegen mehr auf die Spannung, in welcher ſich die ſtrömende Electricität befindet, ankommt. Mit Rückſicht hierauf conſtruirt man auch die Spiralen, in welchen der Strom inducirt werden ſoll, verſchieden. Im erſteren Falle läßt man ſie nämlich aus weniger Windungen beſtehen, wendet aber zu denſelben einen dickeren Draht an; im letzteren Falle dagegen gibt man ihnen recht viele Windungen eines viel dünneren Drahtes. Das Syſtem der Eiſencylinder A und B ſammt den ſie umgebenden Drahtſpiralen nennt man einen Inductor, und zwar, wenn die Spiralen wenige Windungen dicken Drahts haben, einen Quantitätsinductor, wenn ſie aber aus vielen Windungen dünnen Drahtes beſtehen, einen Intenſitätsinductor. Zu den meiſten Maſchinen ſind gewöhnlich beide vorhanden, ſo daß man bald den einen, bald den anderen einſetzen kann. Daß man dann zu den phyſiologiſchen und chemiſchen Wirkungen den Intenſitäts-, aber zu den thermiſchen und magnetiſchen Wirkungen den Quantitätsinductor anwendet, braucht wohl nicht erſt erwähnt zu werden. Bei der älteſten von Pixii im Jahre 1832 conſtruirten Maſchine rotirte nicht der Inductor, ſondern der Magnet, und da es leichter iſt, einen ſtarken Electromagnet, als einen kräftigen Stahlmagnet herzuſtellen, ſo hat Pohl einen Apparat vorgeſchlagen, in welchem der Magnet durch einen Electromagnet erſetzt iſt, und weder der Electromagnet, noch der Inductor zu rotiren braucht, indem die Rotation dadurch erſetzt wird, daß die Pole des Electromagnets immerfort durch den Wechſel der Stromrichtung des den Magnetismus in ihm hervorrufenden Stromes geändert werden.

Steinheil, Wheatſtone und Stöhrer haben gezeigt, daß die magneto-electriſchen Rotationsmaſchinen auch bei den electriſchen Telegraphen ſtatt der galvaniſchen Batterien in Anwendung kommen können.

§. 113. Der ſ. g. Rotationsmagnetismus. 1) Arago fand im Jahre 1825, daß, wenn man unter einer leicht beweglichen Magnetnadel eine horizontale kupferne Scheibe rotiren läßt, alsdann die Nadel nach der Richtung abgelenkt wird, nach welcher die Drehung der Scheibe erfolgt. Die

*) Man hat Commutatoren von verſchiedener Conſtruction. Bei unſeren Maſchinen müſſen die Drahtenden r und s natürlich erſt durch den Commutator geführt werden, ehe ſie durch den Körper geſchloſſen werden. Auch iſt klar, daß der Commutator durch die Maſchine ſelbſt ſtets im rechten Moment in Thätigkeit geſetzt werden muß.

Digitized by Google

Größe der Ablenkung hängt von der Geschwindigkeit der Rotation ab. Hat die Geschwindigkeit einen bestimmten Grad erreicht, so fängt die Nadel selbst an zu rotiren. 2) Umgekehrt kann man auch eine kupferne Scheibe an einem feinen Faden sehr beweglich aufhängen, und unter derselben einen Hufeisenmagnet in verticaler Stellung in schnelle, rotirende Bewegung versetzen. Man wird dann finden, daß die Kupferscheibe bald anfängt, sich ebenfalls in der Richtung des Magnets zu bewegen.

Arago erklärte sich diese Erscheinungen so, daß er annahm, durch die Einwirkung der Magnetpole werde in den darüber oder darunter befindlichen Stellen der Metallscheibe Magnetismus durch Vertheilung erregt, durch den Nordpol Südmagnetismus und durch den Südpol Nordmagnetismus. Diese entgegengesetzten Magnetismen in dem Magnete und der Scheibe suchten sich aber einander festzuhalten, und demnach müßten, wenn die Scheibe oder der Magnet gedreht würden, der Magnet oder die Scheibe folgen. Aus dieser Erklärung ging dann auch der Namen Rotationsmagnetismus hervor, unter welchem man diese und ähnliche Erscheinungen zusammenzufassen suchte. Faraday hat aber gezeigt, daß diese Erklärung unrichtig sei, und daß die angeführten Erscheinungen dadurch hervorgerufen werden, daß der Magnet in der Kupferscheibe electrische Ströme inducirt. Das Vorhandensein dieser inducirten Ströme hat er durch folgenden Versuch dargethan. Er brachte eine um eine horizontale Axe ab (Fig. 21) drehbare kupferne Scheibe B so zwischen die beiden Pole eines Hufeisenmagnets A, daß ihr oberer Rand in die Ebene der beiden Pole oder unter diese Ebene fällt. Die zwischen den Polen befindliche Stelle des Randes, sowie die Axe ab verband er dann mit den beiden Enden eines Multiplicators, und als nun die Scheibe rasch gedreht wurde, wurde die Multiplicatornadel abgelenkt. Bei einer Drehung nach entgegengesetzter Richtung schlug dann auch die Nadel nach der entgegengesetzten Seite aus. Wird auch die Verbindung mit dem Multiplicator aufgehoben, so verschwinden dadurch doch noch nicht die inducirten Ströme, da die Scheibe einen in sich geschlossenen Leiter bildet. Die Bewegung in unseren beiden Versuchen wird hervorgebracht durch die gegenseitige Einwirkung der den Magnet umkreisenden Ströme und des durch dieselben inducirten Stromes in der Kupferscheibe.

Fig. 21.

Da nun ein über einer Kupferscheibe sich drehender Magnet in dieser Ströme inducirt, durch deren Auftreten die Scheibe das Bestreben bekommt, sich in gleicher Richtung zu drehen, so muß die Scheibe, wenn sie fest ist, und sich demnach nicht drehen kann, doch wenigstens ihr Bestreben dadurch kund geben, daß sie auch den bewegten Magnet zurückzuhalten sucht. Bei Beobachtungen von Magnetnadeln ist das lange Oscilliren derselben, bis sie zu einer Ruhelage kommen, sehr störend. Dieser Mißstand kann demnach vermindert werden, wenn man, wie Gauß zuerst angegeben hat, die Nadel über einer kupfernen Scheibe anbringt.

Digitized by Google

Viertes Kapitel.

Von der Thermoelectricität.

§. 114. Erregung eines electrischen Stroms durch Wärme. 1) Biegt man einen Streifen Kupferblech zu einem Rechteck b c d e (Fig. 22) um, doch so, daß die eine Seite b e etwas vorsteht, hält die eine Seite c d parallel über eine leicht bewegliche Magnetnadel, und erwärmt das hervorstehende Ende e a, so wird die Nadel abgelenkt. Man kann auch zu dem Versuche kreisförmige Ringe von Antimon oder Wismuth nehmen, und die eine Hälfte stark erwärmen, während sich über oder unter der andern Hälfte die Magnetnadel befindet, auch hier wird eine Ablenkung der Magnetnadel stattfinden. 2) Wenn man ein Metallstück mit den beiden Enden eines Multiplicatordrahtes verbindet, und dann das Metallstück an irgend einer Stelle stark erhitzt, so weicht die Multiplicatornadel aus. 3) Wenn man 2 Stäbe aus verschiedenen Metallen, am besten Antimon und Wismuth, an einander löthet, und die beiden freien Enden mit dem Multiplicator verbindet, dann die Löthstelle erhitzt, so wird die Nadel ebenfalls aus ihrer Richtung und zwar ziemlich bedeutend abgelenkt. Wird aber die Löthstelle erkältet, so tritt zwar ebenfalls eine Ablenkung der Nadel ein, aber jetzt nach der entgegengesetzten Richtung.

Fig. 22.

Die Ablenkung der Magnetnadel ist offenbar in allen diesen Fällen ein Beweis dafür, daß in den Metallen ein electrischer Strom entstanden ist. In den in 1 angeführten Fällen bilden die Metalle in sich geschlossene Leiter, es war also dem Strom ein Weg geboten, auf welchem er circuliren kann, deßhalb reicht auch in denselben die Nähe einer einfachen Magnetnadel hin, um das Vorhandensein des Stroms zu constatiren. Nicht so ist es aber in dem zweiten Versuche. Das Metallstück für sich ist nicht geschlossen, eine darüber oder darunter gehaltene Magnetnadel wird demnach auch nicht abgelenkt, weil der Strom sich nicht bilden kann. Sowie aber die Enden des Metallstücks mit dem Multiplicator verbunden werden, ist die Leitung vermittelst des Multiplicatordrahtes geschlossen, und der Strom kann zur Erscheinung kommen. Der dritte Versuch endlich zeigt, daß die Wirkung noch sehr gesteigert wird, wenn man statt eines und desselben Metalls 2 verschiedene Metalle anwendet, sowie auch durch seinen zweiten Theil, daß nicht grade eine Erwärmung erforderlich ist, um den Strom zu erzeugen, sondern daß überhaupt eine Temperaturdifferenz dazu hinreicht. Die Entdeckung, daß durch Wärme in einem geschlossenen Leiter electrische Ströme hervorgerufen werden, wurde zuerst von Seebeck im Jahre 1821 gemacht, und der auf diese Weise erzeugten Electricität wurde von ihm der Namen Thermoelectricität (θέρμη, Wärme) beigelegt. Da bei den thermoelectrischen Ketten keine Flüssigkeit in Anwendung kommt, wie bei den gewöhnlichen galvanischen Ketten, so hat auch der Strom in der Kette selbst keinen Widerstand zu bewältigen, und die Intensität desselben hängt daher unter sonst gleichen Umständen wesentlich von dem Wider-

Digitized by Google

stande im Schließungsbogen ab, wie sich leicht aus dem Ohm'schen Gesetz ergiebt. Es folgt hieraus, daß, wenn man gute Wirkungen haben will, der Widerstand im Schließungsbogen so viel, als möglich, vermindert werden muß. Soll also die Schließung der Kette durch einen Multiplicator geschehen, so wird man keinen anwenden, bei welchem um die Nadel recht viele Windungen dünnen Drahtes herumgeführt sind, sondern einen solchen, bei welchem der Draht nur wenige Windungen hat, und dabei ziemlich dick ist.

Sucht man aus der Ablenkung der Magnetnadel nach der Ampère'schen Regel die Richtung des Stroms zu bestimmen, so findet man, wenn die Kette, wie in 1, nur aus einem einzigen Metalle besteht, bald daß der Strom dieselbe Richtung nimmt, in welcher die Wärme sich verbreitet, bald aber auch, daß er die entgegengesetzte Richtung einschlägt. Welcher dieser beiden Fälle eintritt, hängt nur von der materiellen Beschaffenheit des Metalls ab. Bei Kupfer z. B. tritt der erste Fall ein, bei Antimon oder Wismuth der zweite. Anders dagegen ist es, wenn die thermoelectrische Kette aus 2 verschiedenen Metallen besteht. Hier lassen sich die Metalle in eine Reihe ordnen, so daß, wenn man zwei derselben zu einer Kette verbindet, bei Erwärmung der Löthstelle der Strom immer von dem in der Reihe folgenden Metalle durch die Löthstelle zu dem anderen geht, und bei derselben Erwärmung der Strom desto bedeutender wird, je weiter die Metalle in der Reihe von einander abstehen. Diese der electrischen Spannungsreihe (§. 80) entsprechende Reihe wird die thermoelectrische genannt, und ist folgende: Antimon, Eisen, Zink, Silber, Gold, Kupfer, Zinn, Blei, Platina, Neusilber, Wismuth. Die stärksten Wirkungen erhält man also, wenn die Kette aus Antimon und Wismuth besteht, und der Strom geht dann von dem Wismuth durch die Löthstelle zu dem Antimon. Man hat mit Recht darauf aufmerksam gemacht, daß gerade diese Metalle sich durch eine krystallinische Structur vor den übrigen auszeichnen, und es steht zu vermuthen, daß dadurch auch die Art und Weise, wie sie die Wärme durch sich hindurchleiten, gegen diejenige der übrigen Metalle modificirt wird. Untersucht man noch, welchen Einfluß der Grad der Erwärmung auf die Stärke des Stroms hat, so zeigt sich im Allgemeinen, daß sie desto größer wird, je stärker die Erwärmung ist. Aber auch hier zeigen die Metalle keine volle Uebereinstimmung. Bei Ketten aus manchen Metallen wächst die Stärke des Stromes in demselben Verhältniß, wie die Erwärmung, bei Ketten aus anderen Metallen, nur bis zu einer gewissen Grenze, und bei noch anderen scheint eine solche Proportionalität gar nicht vorhanden zu sein.

§. 115. Der Erdmagnetismus durch thermoelectrische Ströme hervorgerufen. Nachdem Ampère die Ansicht aufgestellt hatte, die Erscheinungen des Magnetismus seien nur Wirkungen von electrischen Strömen, welche die Magnete umkreisen (§. 103), und demgemäß, um die Erscheinungen des Erdmagnetismus zu erklären, angenommen hatte, daß auch um die Erde solche Ströme von Ost nach West circulirten, mußte zunächst die Frage aufgeworfen werden, wodurch und auf welche Weise solche Ströme wohl hervorgerufen werden dürften. Für das Entstehen von gewöhnlichen galvanischen Strömen oder von inducirten Strömen war kein Grund aufzufinden, und so mußte man denn bald auf den Gedanken kommen, daß die die Erde umkreisenden Ströme thermoelectrische sein möchten. Diese

Digitized by Google

Annahme mußte sich um so leichter darbieten, als das fortwährende Vorhandensein verschiedener Temperaturverhältnisse an verschiedenen Stellen der Erdoberfläche eine allbekannte Thatsache ist, und man demnach nur nöthig hatte, die Erde als einen in sich geschlossenen Leiter anzusehen. Außerdem gewinnt die Annahme auch noch sehr an Wahrscheinlichkeit durch die Thatsache, daß die regelmäßigen, sowohl täglichen, als auch jährlichen Variationen der Magnetnadel (§. 53), welche doch nur aus einer Verschiedenheit der Intensität des Erdmagnetismus zu verschiedenen Tages- und Jahreszeiten erklärt werden können, in innigem Zusammenhange mit der Temperatur stehen, und desto größer sind, je größer der Wechsel der Temperatur ist. Daß dessenungeachtet die Frage über die Ursache des Erdmagnetismus noch nicht als eine erledigte angesehen werden kann, braucht wohl nicht erst bemerkt zu werden.

§. 116. **Erscheinungen von electrischer Spannung durch Wärme hervorgerufen.** Wird ein Turmalinkrystall erhitzt, so zeigen sich seine beiden Enden entgegengesetzt electrisch, wie sich leicht durch das Goldblattelectroscop nachweisen läßt. Beim Erkalten bekommt dann jedes Ende grade die entgegengesetzte Electricität von derjenigen, welche es beim Erhitzen erhalten hatte. In's Feuer geworfen, zieht er Asche an, wodurch er auch den Namen Aschenzieher erhalten hat. Zerbricht man den Krystall, während er electrisch ist, so zeigt jedes Stück beide Electricitäten, grade so wie die Stücke einer zerbrochenen magnetisirten Stricknadel auch stets beide entgegengesetzte Pole zeigen.

Der Turmalin ist nicht der einzige Krystall, welcher durch Erwärmung in den electrischen Zustand versetzt wird, doch besitzt er diese Eigenschaft in besonders hohem Grade, und man kennt sie auch an ihm schon seit dem Anfange des vorigen Jahrhunderts. Aber auch alle anderen Krystalle, deren Flächen an den Enden einer Axe nicht symmetrisch angeordnet sind, wie z. B. der Boracit, der Topas u. a. haben dieselbe Eigenschaft. Diese Steine gehören zu den Nichtleitern der Electricität, und schon aus diesem Grunde, und weil sie nicht geschlossen sind, begreift sich, daß die Erwärmung keinen Strom in ihnen hervorrufen kann. Dagegen bewirkt die Wärme eine Vertheilung der beiden Electricitäten in ihnen. Doch haben wir uns diese Vertheilung hier anders zu denken, als in einem Leiter, wie wir sie früher (§. 64) haben kennen gelernt. Dort mußten wir annehmen, daß die eine Electricität an dem einen Ende, die andere an dem anderen Ende des Körpers angehäuft werde, was sich namentlich auch daraus ergibt, daß, wenn man einen solchen durch Vertheilung electrisirten Leiter aus 2 Theilen bestehen läßt, die in der Mitte isolirt aus einander genommen werden können, jeder dieser Theile nur die eine Electricität zeigt. Hier dagegen zeigt jedes Stück eines zerbrochenen Turmalinkrystalls beide Electricitäten. Dies erklärt sich aber vollständig, wenn angenommen wird, daß die Vertheilung ähnlich wie bei der magnetischen Vertheilung in jedem einzelnen Molecül für sich bewirkt werde. Diese Verschiedenheit in der Art, wie die Vertheilung erfolgt, ist aber wieder eine nothwendige Folge davon, daß die Krystalle, wie schon bemerkt, Nichtleiter der Electricität sind, und demnach den getrennten Electricitäten keinen Weg, sich einander zu fliehen, darbieten. Die Wärme ruft in diesen Nichtleitern gewissermaßen nur das Bestreben, einen Strom zu bilden, hervor. Daß beim Erkalten diese Körper

Digitized by Google

entgegengesetzte electrische Polarität zeigen, kann nicht auffallen, wenn man sich erinnert, daß die thermoelectrischen Ströme, welche durch Abkühlung erzeugt werden, auch die entgegengesetzte Richtung annehmen von denjenigen, welche der Erwärmung ihr Entstehen verdanken.

Diejenigen Krystalle, welche durch Erwärmen sich electrisch zeigen, nennt man pyroelectrische Krystalle (πῦρ, Feuer).

§. 117. **Thermoelectrische Säule.** Wie man die Wirkungen der galvanischen Kette dadurch zu erhöhen wußte, daß man mehrere einfache Ketten zu einer galvanischen Säule oder Batterie verband, so hat man auch mehrere einfache thermoelectrische Ketten zu einer thermoelectrischen Säule oder Thermosäule verbunden. Fig. 23.

Zu dem Ende werden etwa 20 bis 30 Paare Stäbchen aus Antimon und Wismuth wie in Figur 23 in abwechselnder Folge mit ihren Engraden Löthstellen, also den einander gelöthet, doch so, daß alle Seite, und alle ungraden Löthstellen, also die erste, dritte, fünfte u. s. w. auf die andere Seite zu liegen kommen, und daß sich die Stäbchen immer nur an ihren Enden berühren, während die einzelnen Stäbchen sonst ihrer ganzen Länge nach von einander isolirt sind (gewöhnlich durch Gyps). Das Ganze wird gewöhnlich isolirt in eine metallische Fassung gebracht, an den beiden Endstäbchen, von welchen eins ein Wismuth-, das andere ein Antimonstäbchen ist, sind Drähte angelöthet, welche isolirt durch die metallische Fassung hindurchgehen, und die Pole der Säule bilden. Werden diese mit dem Multiplicator oder auf eine andere Weise leitend verbunden, so ist die Säule geschlossen. Erwärmt man nun alle Löthstellen, welche auf einer Seite liegen, so erzeugt man an jeder derselben einen Strom, welcher von dem Wismuth zu dem Antimon geht. Da diese Einzelströme in allen Stäbchen die nämliche Richtung haben, so verstärken sie sich einander, und die Intensität des Gesammtstromes muß demnach der Summe der Intensitäten der Einzelströme gleich sein, sie muß also auch in demselben Verhältniß, wie die Anzahl der auf einer Seite liegenden Löthstellen, wachsen. Nobili hat uns gelehrt, auf diese Weise Apparate zu construiren, die für die Wärme eine solche Empfindlichkeit zeigen, daß schon die von einer nur genäherten Hand ausstrahlende Wärme hinreicht, einen Strom hervorzurufen, der die Nadel des Multiplicators um ein Bedeutendes ablenkt. Das Entstehen der Ströme kann daher mit Vortheil benutzt werden, um die allergeringste Temperaturdifferenz nachzuweisen in Fällen, in welchen uns alle übrigen bekannten Thermometer und Thermoscope im Stiche lassen. Wir werden auch später in der Wärmelehre sehen, daß die wichtigen Entdeckungen Melloni's über strahlende Wärme nur mit Hilfe der Thermosäule gemacht worden sind.

§. 118. **Wirkungen des thermoelectrischen Stromes.** Von den Wirkungen des thermoelectrischen Stromes haben wir bisher nur eine, und zwar die Ablenkung einer Magnetnadel, kennen gelernt. Man könnte daher noch an seiner Identität mit den übrigen electrischen Strömen zweifeln. Allein es ist gelungen, auch alle übrigen Wirkungen des electrischen Stroms, wenn auch nicht mit einer einfachen thermoelectrischen Kette, doch mit der thermoelectrischen Säule hervorzubringen. Zu diesem Zwecke stellt man dieselbe so auf, daß die eine Seite der Löthstellen durch die strahlende Wärme

Digitized by Google

einer glühenden Eisenplatte erhitzt wird, während zu gleicher Zeit die andere Seite durch aufgelegte Eisstücke erkältet wird. So kann man z. B., wenn die Pole der Säule mit einer langen Spirale von Kupferdraht verbunden worden sind, bei jedesmaligem Oeffnen des Stroms den electrischen Funken beobachten. Ebenso kann man durch den thermoelectrischen Strom Froschschenkel in Zuckungen versetzen, Wasser und Salze zerlegen. Warum keine sehr bedeutende Leitungswiderstände, wie dicke Flüssigkeitsschichten oder sehr lange Leitungsdrähte, in die Schließung eingeschaltet werden dürfen, ohne den Strom fast ganz zu vernichten, ist schon oben (§. 114) aus einander gesetzt worden. Da hier in der Kette keine chemische Zersetzung, also auch keine Polarisation möglich ist, so müssen die thermoelectrischen Säulen offenbar zu den constanten gerechnet werden, so lange die eine Seite der Löthstellen einer gleichförmigen Temperatur ausgesetzt bleibt.

Fünftes Kapitel.

Von der atmosphärischen Electricität.

§. 119. **Die electrische Natur des Gewitters.** Im Jahre 1752 ließ Benjamin Franklin bei einem herannahenden Gewitter in der Nähe von Philadelphia einen Drachen steigen. An dem Ende der hänfenen Schnur befestigte er noch ein Stück einer seidenen Schnur, um den Drachen isolirt halten zu können, und band an die hänfene Schnur nahe an ihrem unteren Ende einen Schlüssel. Nachdem er längere Zeit vergeblich versucht hatte, ob nicht die Schnur oder der Schlüssel electrische Erscheinungen zeigten, bemerkte er endlich, als die Gewitterwolke näher herankam, daß sich lose Fäden der hänfenen Schnur in die Höhe stellten, und als er jetzt mit dem Knöchel eines Fingers dem Schlüssel nahe kam, erhielt er aus demselben auch electrische Funken. Bald darauf fing es an zu regnen, und nun wurden die Funken noch stärker und intensiver.

Franklin war zur Anstellung dieses Versuches durch den Gedanken gebracht worden, daß bei der großen Aehnlichkeit zwischen den Wirkungen des electrischen Funkens und dem Blitze der letztere wohl auch nur ein electrischer Funke in großem Maßstabe sein dürfte. Diese Aehnlichkeit war zu groß, als daß man nicht eine Identität beider Erscheinungen vermuthen sollte; der Blitz beschreibt in der Luft, wie ein starker Funken, eine Zickzacklinie, er sucht sich, wie dieser, zu seinem Wege die besten Leiter der Electricität aus, Erschütterungen, Durchbohren und Zersprengen schlechter Leiter, Schmelzen der Metalle, Entzündung brennbarer Stoffe finden wir unter den Wirkungen des einen, wie des anderen, der Blitz bringt ebenso gut, wie der electrische Funken, auch magnetische Wirkungen hervor, wir sehen ihn bald Eisen magnetisch machen, bald den Magnetismus eines magnetischen Eisens zerstören, oder seine Pole umkehren, auch wurde vielfach an den Orten, wo er einschlägt, ein eigenthümlicher Geruch beobachtet, der nach der von den Beobachtern gemachten Beschreibung an den Ozongeruch der ausströmenden Electricität erinnert. Franklin bot demnach zur Feststellung seiner Vermuthung der Luft bis zu einer großen Höhe einen Leiter der Electricität, die hänfene Schnur, dar, damit, wenn wirklich Electricität in der Luft vorhanden wäre, diese bis zu ihm herab-

Digitized by Google

geleitet würde, der Schlüssel sollte ihm für die herabgeleitete Electricität gewissermaßen als Conductor dienen. Als er die Fäden sich emporsträuben sah, schloß er, daß die Fäden von der Schnur abgestoßen würden, weil sie gleichnamig electrisch geworden seien, grade wie sich die Haare eines auf dem Isolirschämel stehenden Menschen emporsträuben, und daß die Electricität der Schnur in dem Schlüssel sich ansammeln müsse. Durch die aus dem Schlüssel erhaltenen Funken sah er die Richtigkeit seines Schlusses bestätigt. Daß die Funken stärker und intensiver wurden, als es angefangen hatte zu regnen, hat seinen Grund darin, daß die nasse Schnur ein besserer Leiter ist, als die trockne. Bald darauf richtete Franklin an seinem Hause eine isolirte eiserne Stange auf, welche noch über das Dach hervorragte, und beobachtete auch an dieser zu verschiedenen Zeiten bei Gewittern electrische Erscheinungen. Die Versuche Franklin's wurden vielfach wiederholt und stets bestätigt gefunden. Doch sind solche Versuche nur mit der größten Vorsicht anzustellen. Als de Romas 1756 ebenfalls einen Drachen steigen ließ, in dessen Schnur er zu besserer Leitung einen Metalldraht angebracht hatte, und der Drachen sich bis zu einer Höhe von 550 Fuß erhoben hatte, erhielt er Funken von 10 Fuß Länge und 1 Zoll Durchmesser, und zwar, wie er selbst sagt, mindestens 30 solcher Funken in einer Stunde ohne die unzählig vielen von geringerer Ausdehnung, sie waren von einem Krachen begleitet, das er selbst mit dem eines Pistolenschusses vergleicht. Trotz aller genommenen Vorsichtsmaßregeln wurde er dennoch einmal durch die Heftigkeit des Schlages niedergeworfen, ja ein anderer Physiker Richmann wurde 1753 bei solchen Versuchen sogar getödtet, indem von dem Ende einer isolirten eisernen Stange ein Funke in Gestalt eines Feuerballs auf seinen Kopf übersprang.

§. 120. **Fortsetzung; Blitz.** Durch die Versuche des vorigen Paragraphs ist das Vorhandensein der Electricität in der Atmosphäre zur Zeit der Gewitter nachgewiesen. Da wir nun die Blitze vorzugsweise von Wolke zu Wolke überspringen sehen, so bilden also die Wolken gewissermaßen die Conductoren für diese atmosphärische Electricität. Es ist dies auch ganz natürlich, denn Nebel und Wolken bestehen aus lauter einzelnen Dunstbläschen, also aus Leitern, während die trockne atmosphärische Luft zu den Nichtleitern gerechnet werden muß. Von allen Wolken aber sind die Gewitterwolken, wie schon ihr dunkles Aussehen zeigt, die dichtesten, d. h. die Dunstbläschen sind in ihnen am meisten genähert, so daß man annehmen kann, die Gewitterwolke bilde einen zusammenhängenden Leiter. Da sich die Electricität nun nur auf der Oberfläche verbreitet (§. 75), so begibt sich demnach die Electricität aller der einzelnen Bläschen nach der Oberfläche der Wolke, und da diese Oberfläche viel kleiner ist, als die Summe der Oberflächen aller der Dunstbläschen, aus welchen die Wolke besteht, so erhält dadurch die Electricität auch einen hohen Grad von Spannung. Untersucht man an einem Electroscope die aus der Luft herabgeleitete Electricität einer vorüberziehenden Gewitterwolke, so findet man, daß sie bald positiv, bald negativ ist. Wenn demnach zwei entgegengesetzt electrische Wolken einander nahe kommen, so ziehen sie sich gegenseitig an, was sich auch durch die außergewöhnlichen Bewegungen der Wolken, welche man während eines Gewitters am Himmel wahrnimmt, beurkundet. Je nach dem Grade der Spannung der Electricität in ihnen muß dann in größerer oder

Digitized by Google

geringerer Entfernung ein electrischer Funken, ein Blitz, überschlagen. Die Gewitterwolken sind aber auch von allen Wolken diejenigen, welche am tiefsten gehen, d. h. der Erdoberfläche am nächsten sind. Sie wirken daher auch bei dem hohen Grad der Spannung der Electricität vertheilend auf die unter denselben befindliche Erdoberfläche, indem sie die gleichnamige Electricität in dieselbe zurückstoßen, und die ungleichnamige anziehen. Deßhalb findet auch öfter eine Ausgleichung zwischen der Electricität einer Wolke und derjenigen der Erdoberfläche durch Blitze statt, welche zur Erde niederfahren. Nach Arago unterscheidet man 3 Arten von Blitzen, nämlich solche, welche scharfbegrenzte, feurige, im Zickzack gehende Linien bilden, und sich bisweilen in mehrere Aeste theilen, und den aus einem Conductor einer Electrisirmaschine überspringenden Funken vergleichbar sind *), dann solche, welche viel weniger scharf begrenzt sind, ein weniger intensives Licht haben, sich über große Flächen verbreiten, oft nur den Rand einer Gewitterwolke beleuchten, und uns mehr an die aus Spitzen ausströmenden electrischen Strahlenbüschel erinnern **), und endlich solche, welche sich uns als schnell dahinschießende feurige Kugeln darstellen, die, da jeder Lichteindruck in unserem Auge eine kurze Zeit andauert, eine feurige Bahn nach sich ziehen. Die letzten sind diejenigen, welche von einer Wolke zur Erde niederfahren, die einschlagenden Blitze, sie sind dasjenige, was der gemeine Mann mit dem Namen Donnerkeil belegt hat. Außer den bereits im vorigen Paragraph kurz erwähnten Wirkungen des Blitzes soll hier noch eine erwähnt werden, nämlich die Bildung von Blitzröhren. Wenn nämlich der Blitz in trocknes, sandiges Erdreich einschlägt, so werden die auf seinem Wege befindlichen Quarzkörner geschmolzen und zusammengebacken, und dadurch diese Röhren gebildet. Die Zweifel, die sich bei der Auffindung der ersten erhoben, ob sie nämlich wirklich ein Product des Blitzes seien, wurden dadurch gehoben, daß man unmittelbar, nachdem man an sandigen Orten den Blitz hatte niederfahren sehen, nachgrub, und wirklich solche Röhren auffand. Man hat bereits solche Röhren von 20 bis 30 Fuß Länge, und von sehr verschiedener Weite, von einer halben Linie bis zu mehreren Zollen, gefunden, auch solche, die in mehrere Zweige getheilt waren. Daß der einschlagende Blitz nicht immer, wenn er auf brennbare Stoffe trifft, diese flammend entzündet (kalter und warmer Schlag), erinnert uns an die Thatsache, daß auch der kräftige Entladungsfunken einer electrischen Batterie unter Umständen Schießpulver nur umherschleudert, und ist wohl auch auf dieselbe Weise zu erklären, nämlich daß eine Entzündung um so leichter stattfindet, je mehr die Entladung durch schlechtere Leiter verlangsamt wird. Bei den von dem Blitze erschlagenen Menschen kann man daraus, daß sie oft noch ganz in der nämlichen Stellung gefunden werden,

*) Die Bewegung im Zickzack erklärt sich dadurch, daß der Blitz die Luft, welche er vor sich hertreibt, verdichtet, wodurch sie ein schlechterer Leiter wird. Der Blitz geht deßhalb zu der benachbarten, nicht verdichteten Luft, als dem besseren Leiter, über.

**) Diese Blitze sind das, was man gewöhnlich mit dem Namen Wetterleuchten belegt. Außer der Ansicht, daß es electrische Ausstrahlungen aus stark mit Electricität geladenen Wolken seien, findet man auch noch folgende Erklärungen: 1) das Wetterleuchten sind die Blitze von Gewittern in sehr großer Entfernung, so daß wir den die Blitze in der Regel begleitenden Donner gar nicht mehr hören; 2) das Wetterleuchten ist nur der Wiederschein von Blitzen, welche von Wolken unter dem Horizonte ausgehen.

Digitized by Google

in der sie sich unmittelbar vorher befunden haben, schließen, daß der Tod derselben augenblicklich erfolge, und daraus, daß sie meistens nur ganz unbedeutend und zwar äußerlich verletzt sind, darf wohl mit Recht gefolgert werden, daß auch seine Wirkungsweise auf den lebenden Organismus sich von dem Entladungsschlage einer Verstärkungsflasche oder Batterie nur durch größere Intensität unterscheide, daß also der Tod nur die Folge einer zu heftigen Erschütterung des ganzen Nervensystems sei, dessen Reizbarkeit durch dieselbe zerstört wird.

Zur Sicherung unserer Gebäude gegen die zerstörenden Wirkungen des Blitzes versieht man sie nach Franklin's Vorschlag mit den s. g. Blitzableitern. Ihre Wirksamkeit beruht auf der Erfahrung, daß der Blitz, wie die Electricität, unter sonst gleichen Umständen von den ihm durch Leiter dargebotenen Wegen vorzugsweise die nächsten wählt, und daß er sich stets die besten Leiter zu seinem Wege auswählt. Zu dem Ende bestehen die Blitzableiter gewöhnlich aus einer eisernen Stange, welche ohne Unterbrechung der ganzen Höhe des Gebäudes entlang befestigt wird, und über die höchsten Theile noch mit ihrem zugespitzten Ende in die Luft hineinragt, während sie unten so tief in die Erde hineingeführt wird, bis sie mit dem feuchten Erdreich in Berührung kommt. Das obere Ende ist zugespitzt, weil durch eine genäherte Spitze einem electrisirten Körper schon aus einer ziemlichen Entfernung Electricität entzogen wird, und das untere Ende wird bis in das feuchte Erdreich geführt, weil dadurch der herabgeleiteten Electricität eine große Fläche eines Leiters geboten wird, über welche sie sich verbreitet, wodurch sie ihre Spannung verliert. Da geröstetes Eisen den größten Theil seines Leitungsvermögens einbüßt, der Luft ausgesetztes Eisen aber leicht rostet, so pflegt man die oberste Spitze vor dem Rosten dadurch zu schützen, daß man sie vergoldet. Ein isolirender Ueberzug würde die Wirksamkeit des Blitzableiters ganz aufheben, nicht aber, wenn die Electricität einmal bis zur Stange gelangt ist, weßhalb man auch, um die ganze übrige Stange gegen die oxydirende Wirkung der Atmosphäre zu schützen, dieselbe mit schwarzer Oelfarbe überzieht. Auch darf die Stange nicht zu dünn genommen werden, da wir aus §. 87 wissen, daß die thermischen Wirkungen der strömenden Electricität desto bedeutender sind, je größer der Widerstand ist, welchen sie in dem Leiter findet, dieser Widerstand aber wesentlich von der Dicke des Leiters bedingt wird. Eine zu dünne Stange könnte demnach durch die Wirkung des Blitzes geschmolzen werden. Nach der Erfahrung reicht es hin, wenn man den Eisenstangen einen Querschnitt von $\frac{1}{4}$ □Zoll gibt.

Zum Schutze unseres Lebens findet man in den Büchern eine ganze Reihe von Vorsichtsmaßregeln aufgeführt, die sich aber fast alle darauf zurückführen lassen, daß man sich zur Zeit eines Gewitters sowohl von den höchsten Gegenständen unserer Umgebung, als auch von den guten Leitern der Electricität entfernt halten solle.

Zuweilen erleiden Menschen und Thiere starke Erschütterungen, werden durch dieselben zu Boden geworfen, ja selbst getödtet an Orten, an welchen gar kein Blitz sie getroffen hat. Diese Erscheinung erklärt sich dadurch, daß die durch eine Gewitterwolke hervorgerufene Vertheilung an der Erdoberfläche plötzlich aufhört, und die dadurch getrennt gewesenen beiden Electricitäten sich durch rasches Gegeneinanderströmen wieder ausgleichen. Die

Digitized by Google

Vertheilung aber kann aufgehoben werden entweder dadurch, daß die vertheilende Wolke ihre Electricität mit der entgegengesetzten einer benachbarten Wolke oder der Erdoberfläche ausgleicht, oder auch schon dadurch, daß sie schnell vorüberzieht. Eine solche durch die Wiedervereinigung der vertheilt gewesenen beiden entgegengesetzten Electricitäten verursachte Erschütterung bezeichnet man mit dem Worte Rückschlag.

§. 121. **Fortsetzung; Donner.** Bei einem Gewitter wird nach jedem Blitze in größeren oder kleineren Zwischenräumen der Donner wahrgenommen. An Orten, an welchen der Blitz einschlägt, folgt er unmittelbar auf den Blitz, und besteht nur aus einem einfachen, prasselnden Knall. Beim Ueberschlagen eines Blitzes dagegen von einer Wolke zu einer anderen folgt der Donner erst in einem größeren Zeitintervall auf den Blitz, und besteht aus einer Reihe auf einander folgender, dumpfer Schläge von verschiedener Stärke, er ist, wie man es zu nennen pflegt, rollend.

Der Donner ist offenbar wieder im Großen dasselbe, wie das Geräusch oder der Knall, von welchem wir die electrischen Funken unserer Electrisirmaschinen oder Batterien begleitet sahen. Die Lufttheilchen, durch welche die electrische Entladung geht, werden dadurch stark erschüttert, und durch diese Erschütterung in Schwingungen versetzt, welche dann den Schall hervorbringen. Der Donner entsteht also mit dem Blitze zu gleicher Zeit; daß sie aber dessenungeachtet von uns nicht gleichzeitig wahrgenommen werden, daß vielmehr der Blitz stets zuerst beobachtet wird, hat seinen Grund darin, daß sie zur Zurücklegung des Weges von dem Orte ihres Entstehens bis zu uns eine verschiedene Zeit nothwendig haben. Später wird nämlich gezeigt, daß das Licht in jeder Secunde einen Weg von 42100 deutschen Meilen, der Schall dagegen nur einen solchen von 1080 Fuß zurücklegt. Je größer also der Weg ist, welchen Blitz und Donner bis zu uns zu durchlaufen haben, d. h. je weiter die Gewitterwolke von uns entfernt ist, desto mehr muß der Donner gegen den Blitz zurückbleiben. Hieraus erklärt sich auch, warum wir, wenn wir uns an dem Orte befinden, an welchem ein Blitz einschlägt, den Donner unmittelbar nach dem Blitze hören. Das Rollen des Donners hat seinen Grund darin, daß der Blitz oft eine meilenlange Bahn in der Atmosphäre zurücklegt, daß wir auch das Licht des Blitzes wegen seiner ungeheuren Geschwindigkeit und der kurzen Dauer eines Lichteindrucks auf der ganzen Bahn des Blitzes gleichzeitig sehen, daß aber der Blitz auch an jeder Stelle seiner Bahn einen Knall erregt, die sich alle bis zu uns fortpflanzen, aber weil sie ungleiche Wege bis zu uns zurücklegen, nicht gleichzeitig, sondern nur nach und nach ankommen können. An den Orten, an welchen der Blitz aus den Wolken unmittelbar zur Erde niederfährt, fällt dieser Grund des Rollens weg, weßhalb auch hier der Kürze des Wegs entsprechend nur ein prasselnder Knall von kurzer Dauer gehört wird. Verstärkt wird das Rollen wohl noch durch die Zurückwerfung des Schalles an benachbarten Wolken oder auch an irdischen Gegenständen, wie z. B. an Bergen, Felswänden u. d. gl. Daß diese Zurückwerfung aber nicht die einzige Ursache sein kann, geht daraus hervor, daß das Rollen auch auf großen Ebenen und der offenen See wahrgenommen wird; daß sie aber dennoch mitwirkt, lehrt die Erfahrung, nach welcher man das Rollen stärker und anhaltender in gebirgigen, als in ebenen Gegenden hört.

Digitized by Google

§. 122. **Der electrische Zustand der Atmosphäre zu andern Zeiten.** Wenn man zu einer Zeit, wo keine Gewitterwolken am Himmel sind, ja selbst bei ganz heiterem Wetter, auf das Ende eines langen hölzernen Stabes eine Glasröhre befestigt, auf diese eine metallische Spitze kittet, an die Spitze ein Stück brennenden Zunders steckt, und von der Spitze einen Metalldraht bis zu einem Electroscope herabgehen läßt, so wird man durch das Electroscop immer Electricität in der Atmosphäre nachweisen können. Mit dergleichen Untersuchungen haben sich vielfach verschiedene Physiker, von deutschen namentlich Schübler, beschäftigt. Die hauptsächlichsten von denselben gewonnenen Resultate sollen in Folgendem kurz zusammengestellt werden. Sie fanden, daß bei heiterem Wetter die Luft in der Regel positiv electrisch sei, daß diese positive Electricität innerhalb 24 Stunden zwei maxima (einige Stunden nach Sonnenaufgang und kurz nach Sonnenuntergang) und zwei minima (kurz vor Sonnenaufgang und einige Stunden nach Mittag) habe. Diese Periodicität der positiven Electricität wird jedoch nur an heiteren Tagen so regelmäßig beobachtet; bilden sich Wolken, oder fällt gar Regen, so zeigen sich viele Abweichungen, und die Electricität kann dann selbst negativ werden. Aber auch die Jahreszeiten haben Einfluß auf die Luftelectricität, indem sich auch eine regelmäßige, jährliche Periode in der Weise herausstellt, daß die Luftelectricität im Winter im Allgemeinen viel stärker, als im Sommer, ist. Die Intensität ändert sich auch mit der Höhe, und zwar nimmt sie im Allgemeinen mit der Höhe zu, wenngleich ein bestimmtes Gesetz über diese Zunahme noch nicht gefunden ist. Nebel und Wolken wurden im Durchschnitt stark positiv electrisch gefunden. Der niederfallende Regen zeigt sich gewöhnlich desto stärker electrisch, je dichter er ist, also besonders Platzregen, Strichregen und Gewitterregen, doch fast ebenso oft positiv, als negativ electrisch, ja während der Dauer eines und desselben Regens wechseln oft beide Electricitäten mit einander ab. Wie der Regen, so ist auch der Schnee und zwar ebenfalls bald positiv, bald negativ electrisch.

Sobald man wußte, daß die Atmosphäre stets im Zustande der electrischen Spannung sei, konnte für denjenigen, welcher sich erinnert, welche Erscheinungen eine einem electrisirten Conductor genäherte Spitze zeigt, die Erklärung des St. Elmsfeuers nicht mehr zweifelhaft sein. Man versteht darunter das schon den Alten bekannte Phänomen, daß bisweilen an hervorragenden Gegenständen Lichtpunkte oder Feuerbüschel beobachtet werden. Der Name St. Elmsfeuer soll so viel bedeuten, wie das Feuer des heiligen Elmo, d. i. des heiligen Erasmus, der nach Piper seit Jahrhunderten von Schiffern auf dem mittelländischen Meere um Rettung aus Stürmen angerufen wird, und dessen Hilfe man sicher zu sein glaubt, wenn auf dem Maste des Schiffes die Lichterscheinung sich zeigt. Bei den Griechen und Römern hieß das Phänomen Castor und Pollux, welche als Retter in Seegefahr verehrt und von den gefährdeten Schiffern als hilfreich nahe erkannt wurden, wenn sie auf den Masten oder Segeln zwei Lichtflammen erblickten. Erschien dagegen nur ein einfaches Licht, so ward es für Verderben bringend angesehen, und galt für die Erscheinung der Helena, der Schwester jener beiden, weßhalb es dann auch Helenenfeuer genannt wurde.

§. 123. **Nordlicht.** Man beobachtet zuweilen zur Abend- oder Nacht-

Digitized by Google

zeit am nördlichen Himmel einen hellleuchtenden, ein dunkleres Segment umschließenden, bogenförmigen Streifen, dessen Mittelpunkt ungefähr im magnetischen Meridian liegt, und aus welchem von Zeit zu Zeit Lichtbüschel in großer Zahl und von wechselnden Farben nach allen Richtungen ausfahren, und sich oft bis zum Zenith und noch drüber hinaus erstrecken. Da diese Erscheinung nur am nördlichen Himmel, und vorzugsweise in nördlichen Gegenden gesehen wird, so ist ihr der Name Nordlicht beigelegt worden. Aehnliche Erscheinungen sind von Seefahrern auch in den Polargegenden der südlichen Halbkugel gesehen worden, und werden dann Südlichter genannt. Das Nordlicht wird bei uns selten so ausgebildet beobachtet, wie es eben beschrieben wurde. Oft zeigt es sich nur als ein den ganzen nördlichen Himmel erfüllendes, ungewöhnliches, rothes Licht. Man zählt es gewöhnlich zu den electrischen Erscheinungen, und glaubt, daß es durch die atmosphärische Electricität verursacht werde. Für diese Ansicht lassen sich folgende Gründe anführen. Früher ist schon bemerkt worden, daß zur Zeit eines Nordlichts die Magnetnadeln in außergewöhnliche Schwankungen versetzt werden (§. 53). Ferner hat man daraus, daß dasselbe Nordlicht zu gleicher Zeit an ganz weit von einander entfernt liegenden Orten beobachtet wird, geschlossen, daß diese Erscheinungen sich in sehr großer Höhe über der Erdoberfläche bilden müßten, einer Höhe, welche nach Cavendish 15 deutsche Meilen, nach Anderen noch mehr beträgt. In einer solchen Höhe ist aber die Luft schon in einem sehr hohen Grad der Verdünnung. Nun weiß man aus den Versuchen mit der Electrisirmaschine nicht nur, daß die verdünnte Luft ein Leiter der Electricität wird, sondern auch, daß die strömende Electricität in derselben leuchtend erscheint.

§. 124. **Ursachen der atmosphärischen Electricität.** Die Frage, welcher Quelle die atmosphärische Electricität ihre Entstehung verdanke, hat bis jetzt noch keine genügende Beantwortung gefunden. Vielfach hielt man die fortdauernde Verdunstung des Wassers auf der Erdoberfläche für die Hauptquelle, nachdem Volta gezeigt hatte, daß, wenn in einem isolirten Platinschälchen Wasser verdampft wird, das Schälchen sich negativ electrisch zeigt, die aufsteigenden Dämpfe also als positiv electrisch angesehen werden müssen, und nachdem auch durch andere Physiker die Versuche Volta's bestätigt worden waren. Allein in der neuesten Zeit haben Reich und Rieß nachgewiesen, daß ein solches Schälchen allerdings negativ electrisch werde, wenn Wasser in demselben verdampfe, daß dies aber nicht mehr der Fall sei, wenn das Wasser bei gewöhnlicher Temperatur nur verdunste, wie doch in der Natur der Fall ist. Sie glauben, das Auftreten freier Electricität im ersten Falle erkläre sich hinreichend dadurch, daß die Wassertheilchen bei der Verdampfung an den Wänden des Schälchens umhergeschleudert werden, und die Electricität demnach eine Folge der Reibung der Wassertheilchen an den Wänden sei. Da indeß das auf der Erdoberfläche verdunstende Wasser stets fremde Bestandtheile aufgelöst enthält, diese aber durch die Verdunstung ausgeschieden werden, so ist es immerhin wahrscheinlich, daß die aufsteigenden Wasserdünste der Atmosphäre Electricität zuführen, wenn sich gleich aus dieser Quelle die große Menge der Electricität, welche wir in der Luft nachweisen können, nicht ableiten läßt. Auch bei der Verbrennung sollen die gasförmigen Producte derselben, welche in die Luft aufsteigen, freie positive Electricität zeigen, und ebenso soll bei dem

Digitized by Google

Vegetationsproceß eine Electricitätsentwicklung stattfinden (nach Pouillet liefert eine mit Pflanzen bewachsene Fläche von 25 Quadratklaftern in einem Tage mehr positive Electricität, als man zu dem Laden der stärksten Batterie braucht). Aber alle diese Ursachen zusammengenommen dürften noch immer nicht hinreichen, die große Quantität der fortwährend in der Luft vorhandenen Electricität zu erklären. Erwähnt muß noch werden, daß, wenn einmal die aufgestiegenen Wasserdünste sich in der Atmosphäre verdichtet haben, und Wolken bilden, durch die Bewegung der Dunstbläschen und die dadurch an der Luft stattfindende Reibung derselben ebenfalls Electricität entwickelt werden muß.

Sechstes Kapitel.

Von noch anderen Mitteln, Electricität zu erregen.

§. 125. **Electricitätserregung durch Druck.** Aepinus fand, daß, wenn man 2 Glasplatten an einander drückt, sie nach der Trennung entgegengesetzt electrisch sind. Hauy wies nach, daß auch viele Mineralien mit glatten oder polirten Oberflächen durch Druck electrisch werden (Gyps, Flußspath, Schwerspath, Topas, Glimmer, Arragonit, Quarz), und daß diese Eigenschaft in hohem Grade namentlich an kleinen Doppelspathen beobachtet wird, die oft schon durch den bloßen Druck zwischen den Fingern positiv electrisch werden, und dann selbst längere Zeit, oft Tage lang, electrisch bleiben. Aber auch Leiter der Electricität können auf diese Weise in den electrischen Zustand versetzt werden, denn Libes zeigte, daß, wenn man isolirte Metallscheibchen gegen gefirnißten Taffet preßt, sie nachher negativ electrisch sind. Es waren dies jedoch nur vereinzelte Thatsachen, bis Becquerel durch seine Versuche darthat, daß dieselbe Eigenschaft allen Körpern zukomme. Zu solchen Versuchen verfertigt man aus den zu untersuchenden Körpern dünne Scheibchen, befestigt sie mittelst Siegellack an Glasstäbchen, drückt sie dann auf diese Weise isolirt an einander, und untersucht ihren electrischen Zustand an der Coulomb'schen Drehwage. Ist der zu untersuchende Körper ein Electricitätsleiter, so muß nach stattgefundenem Drucke die Trennung rasch bewerkstelligt werden, weil sich sonst nach dem Aufhören des Drucks die beiden entgegengesetzten Electricitäten sofort wieder vereinigen, und gegenseitig neutralisiren. Die Menge der entwickelten Electricität wächst bei denselben Körpern unter sonst gleichen Umständen mit der Größe des Druckes, und zwar nach Becquerel für den Fall, daß der Druck nicht allzu stark ist (von 1 bis 10 Kilogramm), dem Drucke proportional.

Wahrscheinlich ist die Electricitätserregung durch Druck auch die Ursache der von Seefahrern berichteten Erscheinung, daß in den Polarmeeren, wenn 2 Eisblöcke an einander stoßen, ein Lichtblitz beobachtet wird.

§. 126. **Electricitätserregung durch Spaltung.** Wenn man im Dunkeln Zucker oder Kreide zerschlägt oder zerstößt, so beobachtet man einen Lichtschein; ebenso, wenn im Dunkeln ein Glimmerblättchen gespalten wird. Wie beim Glimmer kann die Erscheinung auch bei anderen blätterigen Krystallen wahrgenommen werden. Hat aber der Krystall Blätterdurchgänge nach verschiedenen Richtungen, so ist es nicht einerlei, nach welcher Richtung die Spaltung vorgenommen wird. So sieht man bei dem Topas den

Digitized by Google

Lichtschein nur dann, wenn die Spaltung nach dem auf die Hauptaxe senkrechten Blätterdurchgang vorgenommen wird. Hierher gehört offenbar auch die Erfahrung, daß, wenn geschmolzene Borarsäure beim Erkalten Risse bekommt, an jedem entstehenden Risse eine Lichterscheinung wahrgenommen wird, die oft so intensiv ist, daß sie selbst am Tage gesehen wird.

Daß diese beobachteten Lichterscheinungen electrisches Licht sind, beweist man auf folgende Weise. Wenn man an einem Glimmerblättchen die Spaltung nur anfängt, dann auf beiden Seiten desselben Glasstäbchen befestigt, und nun vermittelst derselben die völlige Spaltung bewirkt, und die gespaltenen Theile an einem empfindlichen Electroscope untersucht, so zeigen sich diese electrisch.

§. 127. **Electricitätserregung durch den Lebensproceß; electrische Fische.** Mehrere Fische, wie der Zitterrochen, der Zitteraal und der Zitterwels, und nach einigen Angaben auch noch der Stachelbauch und der Spitzschwanz, zeichnen sich dadurch aus, daß sie nach Willkür Erschütterungsschläge ertheilen können. Am genauesten bekannt und am meisten untersucht sind die Erscheinungen beim Zitterrochen und Zitteraal. Der Zitterrochen lebt in dem mittelländischen Meer, und in dem atlantischen Ocean, und kommt, jedoch selten, auch in der Nordsee vor. Durch die mit dem Zitterrochen angestellten Versuche ist man zu folgenden Resultaten gelangt. Wenn sich der Fisch in der Luft befindet, und man berührt ihn entweder unmittelbar mit der Hand, oder mittelbar mit einem Metallstabe, so erhält man einen Schlag, nicht aber, wenn die Berührung mit einem Nichtleiter, etwa mit einem Glasstabe, geschieht. Daß diese Schläge von der Willkür des Fisches abhängen, geht daraus hervor, daß man ihn oft mehrere Male hinter einander berühren kann, ohne daß ein Schlag erfolgt; so oft man aber den Fisch reizt, erhält man einen Schlag, und zwar in der Regel einen verstärkten. Der Schlag ist noch durch eine ganze Reihe von Personen, welche sich die Hände geben, fühlbar, wenn von den äußersten Personen die eine den Fisch am Rücken, die andere am Leibe anfaßt. Im Wasser, als einem Leiter der Electricität, kann der Fisch auch in die Entfernung wirken, was aus der gemachten Beobachtung hervorgeht, daß er kleine Fische, welche in seine Nähe kommen, erschlägt oder wenigstens betäubt. J. Davy hat gefunden, daß, wenn man Rücken und Bauch eines Zitterrochens durch einen Metalldraht verbindet, der Draht sich ganz wie der Schließungsdraht einer Volta'schen Säule verhält, daß man also durch denselben auch chemische, magnetische und thermische Wirkungen hervorbringen kann. Schaltet man in diesen Schließungsdraht einen Multiplicator ein, so ergibt sich aus der Ablenkung der Magnetnadel, daß der Strom immer von dem Rücken zu dem Bauche geht. Anatomische Untersuchungen haben gezeigt, daß die electrischen Fische ein eigenes Organ haben, das bei den übrigen Fischen nicht gefunden wird, und vermöge dessen sie ihre electrischen Wirkungen höchst wahrscheinlich hervorbringen. Bei dem Zitterrochen besteht dieses Organ aus einer Menge vertical stehender Säulchen, die durch eine dichtere, sehnige Membrane von einander getrennt sind, und aus einer Menge auf einander geschichteter, feiner Blättchen, zwischen welchen sich sehr klebrige Schleimschichten befinden, gebildet werden. Solcher Säulchen, die in ihrer Construction einer Volta'schen Säule sehr ähnlich sind, liegen auf jeder Seite des Fisches mehrere Hundert.

Digitized by Google

Der Zitteraal, auch der surinamische Aal genannt, wird hauptsächlich in den Landseeen von Südamerika gefunden, und bringt noch kräftigere, electrische Wirkungen hervor, als der Zitterrochen, was schon daraus hervorgeht, daß sich der Schlag desselben von einem Leiter zu einem anderen selbst durch eine dünne Luftschicht fortpflanzen kann, und daß man in diesem Falle einen electrischen Funken überspringen sieht. Der Strom geht bei dem Zitteraal nicht von dem Rücken zu dem Bauche, sondern von dem Kopfe zu dem Schwanz. Dies stimmt auch mit der Construction seines electrischen Organs überein, indem hier die Säulchen in der Richtung des ziemlich langen Schwanzes fortlaufen, also horizontal liegen. Man vergleiche noch, was Alex. von Humboldt in seinen „Ansichten der Natur, 2te Ausgabe Bd. I p. 32—34“ von diesen Fischen erzählt.

Der Zitterwels lebt in mehreren afrikanischen Flüssen, wie im Nil, Niger u. a., über ihn sind jedoch noch keine genaueren Untersuchungen bekannt geworden.

§. 128. **Fortsetzung; Muskel- und Nervenstrom.** Man bedarf nicht einmal eines eigenen Organs, um electrische Ströme in lebenden Organismen nachzuweisen. Nobili hat gezeigt, daß, wenn man die Drahtenden eines sehr empfindlichen Multiplicators mit dem Kopfe und dem Fuße eines lebendigen oder auch eines frisch getödteten Frosches verbindet, die Magnetnadel abgelenkt wird, und durch die Richtung, nach welcher sie abgelenkt wird, einen Strom kund gibt, der von dem Kopfe des Frosches durch den Draht nach dem Fuße, also in dem Frosche von dem Fuße nach dem Kopfe geht. Im weitern Verfolg dieser Entdeckung hat man denn gefunden, daß in allen Theilen des Nervensystems und der Muskeln aller Thiere electrische Ströme vorkommen. Mit Bezug auf diese neuesten Entdeckungen der Physiologie sagt Alex. von Humboldt (Ansichten der Natur Bd. I p. 226): „In allen organischen Theilen stehen ungleichartige Stoffe mit einander in Berührung. In allen ist das Starre mit dem Flüssigen gepaart. Wo also Organismus und Leben ist, da tritt electrische Spannung oder das Spiel der Volta'schen Säule ein: wie die Versuche von Nobili und Matteucci, vor allem aber die neuesten bewundernswürdigen Arbeiten von Emil Dubois lehren. Dem letztgenannten Physiker ist es geglückt „„das Dasein des electrischen Muskelstroms am lebenden, ganz unversehrten thierischen Körper darzuthun““; er zeigt, „„wie der menschliche Körper durch Vermittlung eines Kupferdrahtes die Magnetnadel in der Ferne nach Willkür bald hierhin, bald dorthin ablenken kann““. Ich bin Zeuge dieser nach Willkür hervorgebrachten Bewegungen gewesen, und sehe unerwartet ein großes Licht über Erscheinungen verbreitet, denen ich so viele Jahre mühevoll und hoffend gewidmet hatte“.

Die hier erwähnten Versuche hat Du Bois-Reymond in einem eigenen Werke „Untersuchungen über thierische Electricität“ veröffentlicht. Man ersieht aus demselben, daß er seine Resultate durch Anwendung eines sehr verbesserten, äußerst empfindlichen Galvanometers von 6000 bis 7000 Umwindungen erzielte.

Digitized by Google

Vierter Abschnitt.

Akustik oder Lehre vom Schall.

§. 129. **Wie entsteht der Schall?** Jede Wahrnehmung vermittelst unseres Gehörorgans nennen wir im Allgemeinen einen Schall. Nach der Erfahrung ist jede solche Wahrnehmung bedingt durch die Bewegung eines äußeren Körpers, der in dieser Beziehung der schallende Körper genannt wird. Die Bewegung des schallenden Körpers pflanzt sich durch die Zwischenkörper bis zu unserem Gehörorgane fort, dessen Theile dadurch ebenfalls in Bewegung gerathen, wodurch dann eine Einwirkung auf den Gehörnerv erfolgt, welche im Gehirn als Schall zum Bewußtsein kommt. Aber nicht jede Bewegung eines äußeren Körpers bringt auf diese Weise einen Schall hervor. Bei näherer Beobachtung zeigt sich, daß die Theile eines schallenden Körpers sich in einer schwingenden Bewegung befinden, und daß die einzelnen Schwingungen sehr rasch auf einander folgen. Bei der großen Mannichfaltigkeit von Schällen hat man unter denselben auch noch Unterscheidungen gemacht. So nennt man einen solchen, der eine gewisse Dauer hat, und sich dabei als Etwas Gleichförmiges erweist, einen Klang. Fehlt ihm die Dauer, so heißt er Knall; fehlt ihm aber die Gleichförmigkeit, so heißt er Geräusch. Wenn aber bei einem Klange Rücksicht auf seine Höhe oder Tiefe genommen wird, so wird er ein Ton genannt. Wie die Wahrnehmung unseres Gehörorganes beschaffen sein muß, um einem Klange Höhe oder Tiefe zuzuschreiben, läßt sich freilich eben so wenig angeben, wie wir ja auch nicht die Unterschiede anderer unmittelbaren Sinneswahrnehmungen zu charakterisiren vermögen, z. B. beim Geschmack, was sauer oder süß ist, beim Gesichte die verschiedenen Farbeneindrücke, beim Geruch, was wohl- oder übelriechend ist.

Wenn auch die Lehre vom Schalle im Allgemeinen Akustik (ἀκούω, ich höre) genannt wird, so wird doch in diesem Abschnitte der Physik vorzugsweise auf die Klänge oder Töne Rücksicht genommen, weil nur diese bestimmten Regeln und Gesetzen unterworfen sind.

§. 130. **Die schallenden Körper.** Da Körper dadurch zu schallenden Körpern werden, daß sich die einzelnen Theilchen derselben in einer schnellen, schwingenden Bewegung befinden, die Theilchen eines Körpers aber um so leichter diese Bewegung annehmen können, je elastischer der Körper ist, so werden also vorzugsweise die elastischen Körper zur Schallerzeugung benutzt werden. Nun ist zwar kein Körper vollkommen unelastisch, weßhalb auch durch alle ein Schall erregt werden kann, aber bekanntlich wird die Elasticität der tropfbar flüssigen Körper erst dann bemerklich, wenn sehr bedeutende Kräfte auf sie einwirken (§. 25), d. h. unter den gewöhnlichen Umständen können sie als unelastisch angesehen werden, und daraus erklärt sich, warum sie bei der Construction musicalischer Instrumente keine Anwendung finden. Daß auch von den festen Körpern nicht alle gleich gut den Zwecken entsprechen, sondern nur diejenigen, welchen die Eigenschaft der Elasticität in erhöhtem Grade zukommt, Berücksichtigung verdienen, braucht nicht erst erwähnt zu werden.

Besonders geeignet sind wegen ihres hohen Grades von Elasticität

Digitized by Google

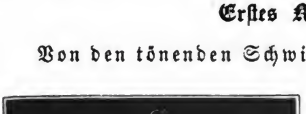
die ausdehnsamen Flüssigkeiten. Wenn dessenungeachtet von denselben in der Regel nur die atmosphärische Luft als schallender Körper benutzt wird, so hat dies offenbar seinen Grund darin, daß diese überall vorhanden und zu allen Zeiten verwendbar ist.

Zur größeren Uebersichtlichkeit sollen im Folgenden die tönenden Schwingungen fester Körper getrennt von denjenigen der Luft abgehandelt werden. Bei der Mannichfaltigkeit fester Körper, die zum Tönen benutzt werden, hat man dieselben in folgende zwei Abtheilungen gebracht: 1) solche mit einer vorherrschenden Dimension und 2) solche mit zwei vorherrschenden Dimensionen. Jede dieser Abtheilungen zerfällt dann wieder in zwei Unterabtheilungen, nämlich in biegsame und starre. In der ersten Abtheilung sind dies die gespannten Saiten und die Stäbe, in der zweiten die gespannten Membranen und die ebenen oder gekrümmten Scheiben.

Erstes Kapitel.

Von den tönenden Schwingungen fester Körper.

Fig. 24.



§. 131. **Schwingungen gespannter Saiten.** acb (Fig. 24) sei eine gespannte Saite, durch einen Zug mit der Hand in c (Guitarre, Harfe), oder durch den Druck eines Violinbogens (Violine, Violoncello, Baßgeige), oder durch den Stoß eines kleinen Hämmerchens (Clavier) sei sie in die Lage ac'b gebracht, dann bleibt sie nicht in dieser Lage, sondern kehrt nach acb zurück. Aber auch hier kommt sie nicht zur Ruhe, sondern bewegt sich weiter nach ac''b. Von da kehrt sie dann wieder nach ac'b zurück u. s. f., doch so, daß ihre äußersten Entfernungen von der Gleichgewichtslage nach und nach immer kleiner werden, bis sie endlich ganz in der Lage acb zur Ruhe kommt. Ist die Saite ziemlich lang, und die Spannung nicht sehr groß, so kann man diese einzelnen Bewegungen deutlich von einander unterscheiden, und wird dann auch finden, daß gegen das Ende der Bewegung hin, wo die Entfernung c'c'' immer kleiner wird, doch der Weg von c' nach c'' in derselben Zeit nicht öfter gemacht wird, als am Anfange.

Da hier zu gleicher Zeit jedes einzelne Theilchen der Saite seine eigene Bahn beschreibt, und seinen Ort nur bis auf eine gewisse Entfernung verläßt, dann aber wieder in entgegengesetzter Richtung nach demselben zurückkehrt, so ist die Bewegung der Saite eine schwingende oder vibrirende. Untersuchen wir dieselbe etwas genauer, so entsteht zunächst die Frage, warum die Saite in der Lage ac'b nicht in Ruhe bleibt. Es ist ihre Elasticität (§. 15), welche sie wieder in ihre Gleichgewichtslage zurückzuführen sucht. Da außer den Endpunkten a und b alle übrigen Theilchen aus ihrer Lage gebracht worden sind, so wirkt die Elasticität auf alle, wir wollen uns hier aber zunächst auf die Bewegung des Theilchens c beschränken. Wir wissen schon von früher, daß, je weiter c nach c' abgelenkt war, desto größer die Kraft ist, welche es wieder nach c zurück-

Digitized by Google

führt. Diese Kraft wirkt aber nicht blos in dem Momente, in welchem der Zug mit der Hand aufhört, sondern so lange, bis das Theilchen wieder in c selbst angekommen ist, nur wird die Einwirkung der Kraft desto schwächer, je näher das Theilchen der Lage c kommt. Würde die Elasticität nur momentan in c' eingewirkt haben, so würde sich das Theilchen mit gleichförmiger Geschwindigkeit nach dem Beharrungsvermögen bis nach c bewegen. Da aber die Elasticität fort und fort auf es einwirkt, und ihm dadurch immer ein neuer Zuwachs an Bewegung ertheilt wird, so muß seine Geschwindigkeit bis nach c hin auch fort und fort wachsen, so daß es auf dem ganzen Wege von c' bis c in c die größte Geschwindigkeit erlangt. In c angekommen sollte es nun eigentlich ruhen, indem nun die Elasticität nicht weiter auf es einwirkt, allein das Beharrungsvermögen treibt es nun mit der erlangten Geschwindigkeit nach c'' weiter. Sobald es aber über c hinausgekommen ist, wird die Elasticität wieder wirksam; jetzt aber sucht sie das Theilchen gerade nach der seiner Richtung entgegengesetzten Richtung zu bewegen, sie vermindert demnach seine Geschwindigkeit, und da sie immer stärker wirkt, je weiter das Theilchen nach c'' gelangt, immer mehr und mehr, bis sie endlich seine Bewegung in c'' ganz aufhebt. Der Rückgang von c'' nach c' erklärt sich ganz auf dieselbe Weise. Die Geschwindigkeit des Theilchens ist also in c' und c'' gleich Null, wächst dann nach c hin immer mehr und mehr, wird in c selbst am größten, und nimmt bei der Bewegung über c hinaus wieder immer mehr und mehr ab, bis sie endlich wieder Null wird. Da die Elasticität auf beiden Seiten von c in gleicher Entfernung von diesem Punkte immer gleich stark wirkt, auf der einen Seite aber die Bewegung beschleunigt, auf der anderen dagegen in demselben Maße verzögert, so sollte also c'c stets = cc'' sein, und eine einmal in Bewegung gesetzte Saite müßte also stets ohne Unterlaß zwischen c' und c'' fort und fort schwingen. Schon oben ist bemerkt, daß dies der Erfahrung nicht entspricht. Die schwingende Saite muß ja fortwährend Lufttheilchen aus ihrer Stelle vertreiben, ihnen also Bewegung mittheilen, folglich an ihrer eigenen Bewegung verlieren. Die schwingende Saite ist aber auch kein vollkommen elastischer Körper (einen solchen gibt es, wie schon bemerkt, gar nicht), und deßhalb ist auch die Kraft der Elasticität, mit welcher die einzelnen Theilchen in die Gleichgewichtslage zurückgeführt werden, nicht ganz der Kraft gleich, welche sie aus derselben abgelenkt hat. Diese beiden Gründe sind es, welche die Excursionen der einzelnen Theilchen (Ausläufe aus ihrer Gleichgewichtslage) immer kleiner werden lassen, so daß sie nach einiger Zeit wieder zur Ruhe kommen. Auf den ersten Anblick könnte es ferner auffallend erscheinen, daß alle Theilchen zu gleicher Zeit die Gleichgewichtslage passiren, während doch die Wege, welche sie bis dahin zurückzulegen haben, desto kleiner sind, je näher die Theilchen nach a oder b hin liegen. Aber je weniger ein Theilchen von seiner Gleichgewichtslage abgelenkt ist, desto geringer ist ja auch die Geschwindigkeit, die ihm durch die Einwirkung der Elasticität ertheilt wird. Daraus erklärt sich auch, warum die ganze Saite, wenn auch die Excursionen abnehmen, doch immer noch in der nämlichen Zeit gleich viele Schwingungen macht. Unter einer Schwingung aber versteht man den Weg von einer Ausbiegung zur anderen, und wieder zurück zur ersten, also von ac'b nach ac''b und von da wieder nach ac'b.

Digitized by Google

Da bei den hier betrachteten Schwingungen alle Theilchen Bahnen beschreiben, welche senkrecht zur Länge ab sind, so nennt man solche Schwingungen Transversalschwingungen (transversus in die Quere liegend) oder Querschwingungen. Wiewohl Transversalschwingungen die gewöhnlichen Schwingungen sind, in welche gespannte Saiten versetzt werden, so sind es doch nicht die einzigen, welche sie annehmen können. Denn wenn man eine gespannte Saite mit einem Violinbogen unter einem sehr spitzen Winkel der Länge nach bestreicht, so gerathen die Theilchen derselben ebenfalls in eine schwingende Bewegung, welche von der eben betrachteten gänzlich verschieden ist. Die Theilchen, auf welchen der Druck des Bogens gerade ruht, werden in der Richtung des Druckes bewegt, dadurch entsteht nach dieser Richtung hin eine Verdichtung der Theilchen, und in Folge dessen nach der entgegengesetzten Richtung eine Verdünnung. Sobald aber der Druck auf diese Theilchen aufhört, indem er bei der Fortbewegung des Bogens zu den nächstfolgenden übergeht, treibt die Elasticität sie wieder in ihre natürliche Lage zurück, sie bewegen sich aber nicht nur in diese, sondern aus denselben Gründen, wie oben, über dieselbe hinaus, dann wieder zurück u. s. f. Jetzt erfolgen also die Schwingungen der einzelnen Theilchen längs der Länge der Saite, weßhalb sie auch in diesem Falle Longitudinalschwingungen (longitudo die Länge) oder Längenschwingungen genannt werden.

§. 132. Fortsetzung; Einfluß der Länge der Saiten auf die Schwingungen. Man nehme eine ziemlich lange und nicht sehr stark gespannte Saite und versetze sie durch einen Zug mit der Hand in Transversalschwingungen, so werden bei gehöriger Länge der Saite die einzelnen Schwingungen so langsam nach einander erfolgen, daß man sie zählen kann. Gesetzt, man habe die Länge gerade so getroffen, daß die Saite in jeder Secunde zwei Schwingungen macht. Einen Ton wird man während der Schwingungen nicht vernehmen. Nun verkürze man die Saite bei gleichbleibender Spannung bis auf die Hälfte, so macht sie jetzt 4 Schwingungen in der Secunde; verkürzt man sie auf ein Drittel, so macht sie sechs Schwingungen u. s. f. Ueberhaupt zeigt sich, daß sich die Anzahl der Schwingungen umgekehrt verhält, wie die Längen der Saite. Bei fortgesetzter Verkürzung werden demgemäß die Schwingungen immer schneller, so daß wir bald nicht mehr im Stande sind, sie zu zählen. In diesem Falle werden wir aber auch bald einen Ton vernehmen, und wenn wir dann die Verkürzung noch weiter treiben, so wird der Ton immer höher.

Wenngleich die Richtigkeit des eben aufgestellten Gesetzes über das Verhältniß zwischen den Längen der Saiten und der in einer bestimmten Zeit erfolgenden Anzahl der Schwingungen bei so rasch auf einander folgenden Schwingungen nicht mehr durch directe Beobachtung geprüft werden kann, so sieht man es doch auch für diesen Fall als gültig an, um so mehr, als alle aus demselben gezogenen Folgerungen, wie sich später noch ergeben wird, vollkommen mit der Erfahrung übereinstimmen, und als es sich auch auf mathematischem Wege als aus der Natur der Schwingungsbewegung nothwendig folgend beweisen läßt. Nennen wir also die verschiedenen Längen L und L', und die denselben entsprechenden Schwingungszahlen N und N', so ist $N : N' = L' : L$. Aus dem Versuche lernen wir auch noch die Abhängigkeit der Tonhöhe von der in einer be-

Digitized by Google

stimmten Zeit erfolgenden Anzahl von Schwingungen kennen, werden aber darauf erst in der Folge näher eingehen.

§. 133. **Fortsetzung; Einfluß der Spannung, der Dicke und der Dichte.** 1) Wird der Versuch des vorhergehenden Paragraphen dahin abgeändert, daß man die Länge der Saite beibehält, dagegen die Spannung derselben nach und nach immer mehr vergrößert, so zeigt sich im Allgemeinen, daß bei größerer Spannung die Schwingungen rascher auf einander folgen. Um diese Abhängigkeit zwischen der Spannung und der Anzahl der Schwingungen näher zu untersuchen, muß die Spannung meßbar sein, was am einfachsten dadurch erzielt wird, daß man die Spannung durch angehängte Gewichte bewirkt. Gesetzt die Saite sei, als sie zwei Schwingungen in der Secunde machte, durch 1 Pfund gespannt gewesen. Man hänge nun wieder so lange Gewichte an, bis sie vier Schwingungen in der Secunde macht, und man wird finden, daß dies eintreten wird, wenn die Saite durch 4 Pfund gespannt ist. Ebenso wird sie sechs Schwingungen machen, wenn 9 Pfund angehängt werden. Es ergibt sich also hieraus das Gesetz, daß sich bei derselben Saite die Anzahl der Schwingungen in einer bestimmten Zeit verhält wie die Quadratwurzeln aus den spannenden Kräften. Wenn also die zu den Schwingungszahlen N und N′ gehörigen spannenden Kräfte P und P′ heißen, so ist $N : N' = \sqrt{P} : \sqrt{P'}$. Da die Höhe des durch die Schwingungen erzeugten Tones von der Anzahl der Schwingungen abhängt, so wird also auch der Ton einer Saite desto höher, je stärker sie gespannt ist. 2) Nimmt man mehrere Darmsaiten von gleicher Länge, welche auch alle durch gleiche Gewichte gespannt sind, deren Dicke aber verschieden ist, und versetzt dieselben in Schwingungen, so wird man finden, daß die dickste derselben in einer Secunde die wenigsten Schwingungen macht, und daß sie überhaupt desto schneller schwingen, je dünner sie sind. Hat man vorher die verschiedenen Dicken genau gemessen, so wird man sehen, daß sich für eine bestimmte Zeit die Anzahl der Schwingungen der verschiedenen Saiten umgekehrt wie ihre Dicken verhält. Bezeichnen wir unter den gegebenen Voraussetzungen die Dicken zweier Saiten mit D und D′, während wieder N und N′ die denselben entsprechenden Schwingungszahlen sind, so ist also $N : N' = D' : D$. Es folgt auch aus dem angeführten Gesetze, daß unter sonst gleichen Umständen die dickeren Saiten tiefere Töne erzeugen, als die dünneren. 3) Hat man endlich zwei gleich lange, gleich dicke, und gleich gespannte Saiten, aber von verschiedener materieller Beschaffenheit, die eine z. B. eine Darmsaite, und die andere eine Messingsaite, und läßt sie beide schwingen, so machen sie doch nicht in derselben Zeit gleich viele Schwingungen, sondern die Darmsaite macht deren mehr, als die Messingsaite. Der Grund dieser Verschiedenheit kann offenbar nur in einer verschiedenen Anordnung der Theilchen in beiden Stoffen, also in ihrer verschiedenen Dichte liegen. Als man mit Rücksicht hierauf die Schwingungszahlen untersuchte, entdeckte man auch wirklich das Gesetz, daß sich die Schwingungszahlen umgekehrt wie die Quadratwurzeln aus den Dichten, oder, was dasselbe ist, aus den specifischen Gewichten verhalten. Nennen wir daher die specifischen Gewichte S und S′, so ist $N : N' = \sqrt{S'} : \sqrt{S}$.

Soll nun ganz allgemein das Verhältniß der Schwingungszahlen zweier

Digitized by Google

Saiten aufgesucht werden, so müssen offenbar alle die gefundenen Verhältnisse, von welchen jedes einzelne dem Verhältnisse der Schwingungszahlen, jedoch immer nur unter gewissen Voraussetzungen, gleich war, zusammengesetzt werden. Das aus denselben zusammengesetzte Verhältniß heißt aber $L' \times \sqrt{P} \times D' \times \sqrt{S'} : L \times \sqrt{P'} \times D \times \sqrt{S}$ oder in anderer Form $\frac{\sqrt{P}}{L \times D \times \sqrt{S}} : \frac{\sqrt{P'}}{L' \times D' \times \sqrt{S'}}$, also ist $N : N' = \frac{\sqrt{P}}{L \times D \times \sqrt{S}} : \frac{\sqrt{P'}}{L' \times D' \times \sqrt{S'}}$, d. h. die Schwingungszahlen zweier Saiten verhalten sich, wie die Quotienten, welche man erhält, wenn man die Quadratwurzel aus der spannenden Kraft dividirt durch das Product aus der Länge, Dicke und der Quadratwurzel aus dem specifischen Gewichte der Saite.

Aus den angeführten Gesetzen erklärt sich auch hinlänglich die Bespannung des Claviers und der Harfe, bei welchen beiden Instrumenten für jeden Ton eigene Saiten aufgezogen sind. Bei dem Clavier sind für jeden Ton 2 oder 3 Saiten vorhanden, aber von gleicher Länge, gleicher Dicke, gleicher Spannung und gleicher materieller Beschaffenheit, die zur Erzeugung des Tones zu gleicher Zeit in Schwingungen versetzt werden. Der Grund dieser Einrichtung ist kein anderer, als durch dieselbe die Stärke des Tones zu vergrößern. Bei den übrigen Saiteninstrumenten, wie bei der Guitarre, Violine u. s. w. muß die Mannichfaltigkeit der Töne durch eine nur sehr beschränkte Zahl von Saiten erzielt werden. Es geschieht dies dadurch, daß der Spieler durch das Greifen die Saiten selbst verlängert oder verkürzt, da die Länge der Saite immer nur bis dahin gerechnet werden kann, wo sie durch den Finger des Spielenden niedergedrückt ist. Bei einigen, wie bei der Guitarre, ist dem Spieler die Stelle, wo für einen gegebenen Ton die Saite gegriffen werden muß, bestimmt angegeben, bei anderen, wie bei der Violine, ist dies nicht der Fall, weßhalb auch das Spielen von Instrumenten der letzteren Art schwerer zu erlernen ist. Das Stimmen der Saiteninstrumente, d. h. das Bewirken, daß die Töne, welche durch die einzelnen Saiten erzeugt werden, im richtigen Verhältniß der Höhe zu einander stehen, geschieht bekanntlich dadurch, daß die Wirbel angezogen oder nachgelassen werden. Es erklärt sich dies daraus, daß im ersteren Falle die Spannung vermehrt, im letzteren vermindert, und dadurch der Ton entweder höher oder tiefer gemacht wird.

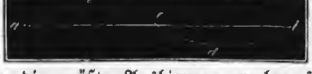
§. 134. **Schwingungen der Saiten in aliquoten Theilen.** 1) Wenn man eine gespannte Saite in ihrer Mitte leise mit dem Finger berührt, und in der Mitte der einen Hälfte durch einen Violinbogen in Querschwingungen versetzt, nachdem man an verschiedenen Stellen der anderen Hälfte kleine, rechtwinklich umgebogene Papierschnitzchen aufgesetzt hat, so wird man finden, daß diese Papierreiterchen alle abgeworfen werden. 2) Berührt man aber die Saite in einem Drittel ihrer Länge, und setzt auf den größeren Theil solche Papierreiterchen auf, so daß eins derselben grade in die Mitte dieses längeren Theils, also in $\frac{2}{3}$ der Länge, zu sitzen kommt, so werden die Reiterchen, wenn der kleinere Theil mit dem Violinbogen gestrichen wird, ebenfalls abgeworfen, nur das nicht, welches auf die Mitte des größeren Theils war aufgesetzt worden. 3) Berührt man aber die Saite

Digitized by Google

in einem Viertel ihrer Länge, dann bleiben die Reiterchen, die auf die Punkte gesetzt waren, welche $\frac{1}{3}$ und $\frac{2}{3}$ der Länge entsprechen, sitzen, während die übrigen alle herunterfallen. So kann man die Theilung fortsetzen, immer werden die Schnitzchen in den entsprechenden Theilungspunkten sitzen bleiben, alle übrigen aber weggeschleudert werden. Diese Versuche werden am besten mit Hilfe des Monochords (μόνος, η, ον, einzig und χορδή, die Saite, also das einsaitige Instrument) angestellt. Ueber die Deckplatte eines länglich viereckigen Kastens, die aus trocknem Tannenholze von möglichst gleichmäßigem Gefüge besteht, und aus Gründen, welche erst später (§. 163) entwickelt werden, Resonanzboden heißt, ist eine Saite der Länge nach dermaßen gespannt, daß sie, am einen Ende befestigt, zunächst über einen unbeweglichen Steg, dann über einen beweglichen Steg, und über eine am anderen Ende des Kastens befestigte Rolle läuft, und hier durch ein angehängtes Gewicht gespannt wird. Auf dem Resonanzboden ist von dem unbeweglichen Stege an eine genaue Theilung angebracht.

Aus dem ersten Versuch geht hervor, daß auch die zweite nicht gestrichene Hälfte der Saite schwingt, denn nur dadurch, daß die Theilchen der Saite in dieser Hälfte selbst in Bewegung sind, können sie auch den Papierschnitzchen Bewegung mittheilen.

Fig. 25.



Die Schwingungen der Saite müssen aber jetzt anders erfolgen, als die in §. 131 beschriebenen, denn der mittelste Punkt c (Fig. 25), der die größte Ausbiegung machen sollte, ist jetzt durch die Berührung an der Bewegung gehindert. Durch den Violinbogen, der zwischen c und b nach Unten streicht, werden die Theilchen zwischen c und b in die Lage cdb versetzt. Die Theilchen zwischen a und c können nun auch in ihrer Lage nicht verharren, denn in Folge der Elasticität haben die neben einander liegenden Theilchen das Bestreben, eine gradlinige Richtung zu bilden. Diesem Bestreben kann aber nicht anders genügt werden, als wenn die c zunächstliegenden Theilchen von ac sich über ac nach Oben erheben. Diese ziehen dann wieder die folgenden fort. Weil nun die Saite in a befestigt ist, so muß diese Ausbiegung in der Mitte zwischen a und c ihre Grenze erreichen, und dann nach a hin wieder abnehmen. Wir haben uns also vorzustellen, daß die beiden Hälften der Saite in der Art schwingen, wie es in Fig. 25 angedeutet ist, d. h. daß sich die entsprechenden Theilchen beider Hälften stets in entgegengesetztem Schwingungszustande befinden. Wenn in dem zweiten und dritten Versuche durch den Violinbogen unmittelbar nur ein kleinerer Theil der Saite, ein Drittel, Viertel, u. s. w. in Schwingungen versetzt wird, so sehen wir im Allgemeinen, daß auch der übrige größere Theil dadurch in Schwingungen geräth, aber nicht alle Punkte desselben nehmen jetzt an der schwingenden Bewegung Theil, da ja die Reiterchen an gewissen Stellen nicht abgeworfen werden. Es geht aus den Versuchen hervor, daß sich die Saite immer in lauter dem unmittelbar gestrichenen Theile gleiche Theile abtheilt, von welchen jeder für sich schwingt. Aus den angeführten Gründen müssen aber immer je 2 neben einander liegende Theile nach entgegengesetzten Richtungen schwingen. Die Punkte, welche bei diesen Schwingungen einer Saite in aliquoten Theilen in Ruhe bleiben, nennt man Schwingungsknoten.

Digitized by Google

Wenn man sich schon in der Musik bei Saiteninstrumenten gewöhnlich nur der ersteren Schwingungsart, wo eine Saite der ganzen Länge nach schwingt, bedient, so kommt doch bei den Streichinstrumenten auch die Schwingung in aliquoten Theilen zuweilen in Anwendung zur Erzeugung der s. g. Flageolet-Töne. Man versteht darunter sehr hohe Töne, denen man diesen Namen wegen ihrer Aehnlichkeit mit den Tönen des Flageolets beigelegt hat, und die eben dadurch hervorgerufen werden, daß der Spieler die Saite in irgend einem Theilpunkte sanft mit dem Finger berührt, und sie dann leise mit dem Bogen streicht, wodurch sie von selbst durch entstehende Schwingungsknoten in aliquote Theile getheilt wird. Die Töne sind sehr hoch, weil die schwingenden Theile im Verhältniß zur ganzen Saite nur klein sind, in demselben Verhältniß aber die Schwingungen schneller und also der Ton höher wird. Die Schwingungszahl der ganzen Saite verhält sich zu den Schwingungszahlen der so entstehenden Töne offenbar wie die Zahlen 1, 2, 3, 4 u. s. w. Töne aber, deren Schwingungszahlen in einem so einfachen Verhältniß zu einander stehen, machen bei dem Zusammentönen auf unser Ohr einen angenehmen Eindruck, es sind harmonische Töne. Daraus erklärt sich nun auch die Wirkung der Aeolsharfe (Aeŏlus, König der Winde). Sie besteht aus einem schmalen, aber ziemlich langen Resonanzboden, über welchen mehrere Saiten in ganz gleicher Stimmung gespannt sind. Sobald dieses Instrument einem Luftzug ausgesetzt wird, erklingt es in lauter harmonischen Tönen. Die Saiten werden nämlich durch den Luftzug in schwingende Bewegung gesetzt, wobei sie sich, je nachdem sie von dem Winde auf verschiedene Art getroffen werden, in eine größere oder kleinere Zahl von gleichen Theilen abtheilen.

§. 135. **Schwingungen elastischer Stäbe.** Da die Stäbe, welche hier in Betracht kommen, schon an und für sich elastisch sind, ohne es erst, wie die Saiten, durch künstliche Spannung zu werden, so können die Versuche, durch welche man die Gesetze ihrer Schwingungen auffinden will, auf mannichfache Art abgeändert werden. Man unterscheidet gewöhnlich nach Chladni folgende 6 Fälle: 1) daß nur das eine Ende befestigt ist, 2) daß dieses Ende nur an einen festen Körper angestemmt ist, 3) daß die beiden Enden frei sind, 4) daß die beiden Enden angestemmt sind, 5) daß beide Enden befestigt sind, und 6) daß das eine Ende befestigt, und das andere angestemmt ist. Da indeß von den Schwingungen elastischer Stäbe in der Musik nur wenig Gebrauch gemacht wird, so beschränken wir uns hier auf den ersten Fall, der auch in den Schweizer Spieluhren und Spieldosen in Anwendung kommt.

Fig. 26.

ab (Fig. 26) sei ein elastischer bei a befestigter Stab. Um ihn in Transversalschwingungen zu versetzen, genügt ein bei b senkrecht zu ab wirkender Zug. Durch denselben werde b nach b' gebracht, so wird der Stab vermöge seiner Elasticität, und weil er bei a befestigt ist, die Gestalt ab' annehmen, dann aber ganz aus denselben Gründen, welche oben bei den Saiten entwickelt sind, zuerst mit wachsender Geschwindigkeit nach ab zurückkehren, und von hier mit abnehmender Geschwindigkeit sich bis in die Lage ab" fortbewegen, dann wieder nach ab' u. s. f. schwingen. Untersucht

Digitized by Google

man nun, welchen Einfluß die Länge des Stabes auf die Geschwindigkeit seiner Schwingungen hat, indem man ihn immer näher nach b hin einklemmt, so findet man, daß sich die Schwingungszahlen verhalten, umgekehrt wie die Quadratwurzeln aus den Längen, und nicht, wie bei den Saiten, umgekehrt wie die Längen. Dies ist indeß nicht die einzige Abweichung von den Schwingungen der Saiten, denn untersucht man jetzt den Einfluß der Dicke bei gleichbleibender Länge und Stäben von demselben Stoffe, so finden wir, daß Stäbe desto schneller schwingen, je dicker sie sind, und zwar in grade dem Verhältniß der Dicke, während bei den Saiten grade der umgekehrte Fall stattfand. Von einem Einfluß der Spannung auf die Schwingungszahl kann hier nicht die Rede sein, wohl aber muß hier statt derselben der höhere oder niedere Grad der Elasticität des Stoffes, aus welchem der Stab gemacht ist, beachtet werden, und es ist für sich klar, daß die Schwingungszahl mit der Elasticität wachsen muß. Befestigt man an dem freien Ende eines solchen elastischen Stabes ein polirtes Knöpfchen oder eine Glasperle, so sieht man die Glasperle, wenn der Stab durch einen Schlag mit einem Hämmerchen in transversale Schwingungen versetzt wird, verschiedene symmetrische Figuren beschreiben. Eine solche Vorrichtung wurde zuerst von Wheatstone angegeben, und von ihm Kaleidophon (καλός, ή, όν, schön, εἶδος, Gestalt und φωνέω, tönen) genannt. Wenn die Schwingungen des Stabes immer in derselben Ebene erfolgten, so könnte die Perle offenbar nur eine grade Linie beschreiben, wir müssen demnach den Schluß ziehen, daß die Schwingungen des Stabes nicht immer in derselben Ebene liegen.

Der Stab ab kann aber nicht blos seiner ganzen Länge nach schwingen, sondern auch, wie die Saiten, in aliquoten Theilen. Es wird dies jedesmal geschehen, wenn man ihn an einer Stelle, wo ein Schwingungsknoten entstehen kann, leise berührt. Aber auch in Beziehung auf die Schwingungsknoten zeigen die Stäbe eine Verschiedenheit von den Saiten, denn die Erfahrung lehrt, daß der dem freien Ende nächste Schwingungsknoten von diesem freien Ende nur halb so weit entfernt ist, als die Entfernung eines Schwingungsknotens von dem nächsten, oder eines Schwingungsknotens von dem festen Ende.

Fig. 27.

Danach kann also in der Mitte von ab kein Schwingungsknoten sein, wohl aber ein Drittel, Fünftel u. s. w. der Länge von b entfernt. Im ersteren Fall schwingt der Stab mit einem, im zweiten mit 2 Schwingungsknoten u. s. f., wie aus Fig. 27 ersichtlich ist.

§. 136. **Fortsetzung.** Wird der Stab der Länge nach mit einem Lappen gerieben (ein Glasstab mit einem nassen Lappen, ein Metallstab mit einem mit gepulvertem Colophonium bestreuten Lappen), so geräth er aus den gegen Ende von §. 131 entwickelten Gründen in Longitudinalschwingungen. Man kann diese Schwin-

Digitized by Google

gungen sichtbar machen, wenn man Papierscheibchen über den Stab steckt, die dann die Bewegung der Theilchen des Stabes annehmen. Durch solche Versuche überzeugt man sich, daß der Stab auch jetzt bald seiner ganzen Länge nach, bald aber in aliquoten Theilen schwingt. Im letzteren Falle schiebt sich nämlich das Scheibchen nur bis zu einem gewissen Punkte fort, an welchem angelangt es sich dann nicht weiter bewegt. Werden auf diese Weise die Schwingungsknoten ermittelt, so ergibt sich für die Lage derselben auch bei Longitudinalschwingungen dasselbe Gesetz, das im vorhergehenden Paragraph auch bei den Transversalschwingungen erwähnt war. Aus der Geschwindigkeit, mit welcher die Papierscheibchen sich bewegen, läßt sich auch auf die Geschwindigkeit der Schwingungen schließen. Die Versuche zeigen nun, daß diese nur von der Länge und von der Materie des Stabes abhängt, nicht aber von seiner Breite oder Dicke, so daß also, z. B. alle Glasstäbe von gleicher Länge, sie mögen dick oder dünn, hohl oder massiv, oder als Streifen gestaltet sein, gleich schnell schwingen. Außer den Transversal- und Longitudinalschwingungen hat Chladni an elastischen Stäben auch noch eine dritte Art von Schwingungen, nämlich drehende Schwingungen entdeckt, bei welchen die Theilchen des Stabes sich abwechselnd rechts und links in einer schraubenförmigen Richtung so bewegen, als ob sie sich um ihre Axe drehen wollten. Man bringt nach ihm solche Schwingungen am besten an cylindrischen Stäben, die eine recht glatte Oberfläche haben, dadurch hervor, daß man sie ebenso reibt, wie bei den Longitudinalschwingungen, nur nicht nach der Richtung der Länge, sondern links oder rechts in einer drehenden Richtung.

Bisher waren immer grade Stäbe vorausgesetzt. Wird nun ein grader Stab gebogen, so müssen seine Schwingungen der Hauptsache nach den Schwingungen eines graden Stabes mit beiden freien Enden, aus dem der gebogene Stab ja entsteht, entsprechen. Ein solcher hat aber bei seiner einfachsten Schwingungsweise mindestens 2 Schwingungsknoten, die nach dem obigen Gesetz den Stab so theilen, daß der mittlere Theil doppelt so lang ist, als die beiden äußeren. Je mehr nun der Stab gebogen wird, desto mehr rücken die beiden Schwingungsknoten zusammen, desto größer werden also die beiden äußeren Theile, und desto langsamer schwingen sie demnach. Solche Stäbe, welche bis zum Parallelismus ihrer beiden Schenkel gekrümmt sind, und der bequemeren Handhabung wegen in der Mitte mit einem Stiele versehen sind, sind die in der Musik viel gebrauchten Stimmgabeln. Aus dem Gesagten geht auch hervor, daß, wenn die Stimmgabeln, wie gewöhnlich, nur mit 2 Knoten schwingen, die Schenkel derselben sich zu gleicher Zeit nach Innen und nach Außen bewegen, da die Schenkel, als der erste und dritte Theil des Stabes, stets nach derselben Seite der Gleichgewichtslage schwingen müssen. Die Schwingungen anders gekrümmter Stäbe, wie des in der Musik gebräuchlichen Triangels, sind noch zu wenig untersucht, als daß hier Etwas darüber gesagt werden könnte.

§. 137. **Schwingungen gespannter Membranen.** Die Untersuchungen über die Schwingungen gespannter Membranen haben bis jetzt zu wenig zuverlässigen Resultaten geführt, sind aber auch nicht sehr eifrig verfolgt worden, weil die gespannten Membranen in der Musik doch nur eine untergeordnete Rolle spielen. Man unterscheidet zunächst Membranen von

Digitized by Google

überwiegend größerer Länge, als Breite, welche an beiden Enden gespannt sind, und kreisförmige, die nach allen Richtungen gespannt sind (Trommel, Pauke, Tamburin). Die ersteren sieht man als ein Aggregat lauter parallel gespannter Saiten an. Werden solche Membranen durch irgend einen Anstoß in Transversalschwingungen versetzt, so schwingen sie ganz nach denselben Gesetzen, wie die gespannten Saiten. Die Membrane kann als Ganzes oder in aliquoten Theilen schwingen. Im letzteren Falle liegen dann die Schwingungsknoten der einzelnen als Saiten betrachteten Theile neben einander, und bilden grade, zur Länge der Membrane senkrechte Linien. Bei schwingenden Flächen heißen solche aus neben einander liegenden Schwingungsknoten gebildete Linien Knotenlinien. Ist die Membrane kreisförmig und nach allen Richtungen gespannt, dann sieht man es so an, als ob jeder Durchmesser für sich wie eine gespannte Saite schwinge. In der Musik läßt man durch die Pauke immer nur einen und denselben Ton hervorbringen, und da dieser der tiefste ist, welcher überhaupt auf diesem Instrumente hervorgerufen werden kann, so schwingt das Paukenfell in diesem Falle als Ganzes, d. h. alle Theilchen desselben erheben sich zu gleicher Zeit über die Gleichgewichtslage, und senken sich unter dieselbe, wobei die Excursionen der einzelnen Theilchen desto mehr abnehmen, je näher sie dem Rande liegen. Sollen die einzelnen Durchmesser einer Membrane in aliquoten Theilen schwingen, so hat Chladni nachgewiesen, daß alle Schwingungsarten, bei welchen sich auf jedem Durchmesser eine ungrade Anzahl von Schwingungsknoten bilden würde, unmöglich sind, daß dagegen in den übrigen Fällen, in welchen die Anzahl der entstehenden Schwingungsknoten grade ist, die Knotenlinien nur concentrische Kreise sein können, die alle den Mittelpunkt der Membrane zum Mittelpunkt haben.

Andere Schwingungen, als Transversalschwingungen, kennt man bei der Membrane nicht. Bei den Schwingungen gespannter Membranen muß auch die von Marx erfundene Aeoline erwähnt werden, so genannt, weil eine gespannte Membrane durch einen gegen sie geblasenen Luftstrom (Aeolus) in Schwingungen versetzt wird. Daß die Membrane hier auf verschiedene Weise schwingen kann, geht daraus hervor, daß sich mit diesem Instrumente verschiedene Töne hervorrufen lassen. Will man die verschiedenen Schwingungsarten dem Auge dadurch sichtbar machen, daß man auf die Membrane feinen Sand streut, so bemerkt man allerdings, daß dieser in eine hüpfende Bewegung geräth. Nach Marx soll er sich dann in einige grade Linien als Kreissehnen und in verschiedene krumme Knotenlinien ordnen. Es würden dies natürlich Stellen sein, an welchen die Membrane nicht schwingt. Meistens jedoch sieht man die beschriebenen Knotenlinien sich nicht bilden, sondern der Sand zeigt fast immer eine vorherrschende Neigung, sich nach dem Rande hin zu bewegen.

§. 138. **Schwingungen ebener Scheiben.** Nimmt man ebene Platten von Glas, Metall oder Holz, und hält sie an irgend einer Stelle zwischen 2 Fingern oder mittelst einer Schraube, bestreut sie mit feinem, von Staub befreitem Sand, und streicht sie an irgend einem Punkte des Randes mit einem Violinbogen, den man stark mit Colophonium gerieben hat, so wird man finden, daß, sobald ein Ton entsteht, der in hüpfende Bewegung gerathene Sand sich in graden oder krummen Linien, welche symmetrische Figuren bilden, anhäuft und liegen bleibt. Die Scheiben, die man dazu

Digitized by Google

verwendet, können verschieden gestaltet sein, dreieckig, quadratförmig, rechteckig, fünfeckig, kreisförmig, elliptisch u. s. w. Man nennt die gebildeten Figuren Klangfiguren oder nach ihrem Erfinder Chladni'sche Figuren. Die entstehenden Figuren sind sehr mannichfaltiger Art, bald Sterne mit mehr oder weniger Strahlen, bald Kreise mit und ohne Diameter, bald Parallellinien geschnitten durch Parallellinien u. s. w.

Aus diesen Versuchen geht hervor, daß, da durch den Sand immer Knotenlinien angedeutet werden, die Scheibe nie als Ganzes, sondern stets nur in aliquoten Theilen schwingt. Es ist dies auch gar nicht möglich, da die gehaltene Stelle wenigstens nicht in Schwingungen versetzt werden kann, weßhalb auch durch diese Stelle immer wenigstens eine Knotenlinie geht. Aus der Symmetrie der Figuren geht aber auch ferner hervor, daß diese Theilung nur nach ganz bestimmten Gesetzen erfolgt. Hüpft schon der Sand bei jedem Bestreichen mit dem Bogen, so bildet sich doch immer die Figur erst dann, wenn ein reiner Ton zum Vorschein kommt. Auch zeigt sich bei Wiederholung der Versuche, daß, so oft dieselbe Scheibe unter denselben Umständen denselben Ton gibt, auch stets auf derselben ganz dieselbe Figur sichtbar wird, so oft aber durch stärkeres oder schwächeres Streichen der Ton wechselt, auch stets die Figur in eine andere übergeht. Ueberhaupt hängt die Gestalt der Figur ab von der Gestalt der Scheibe, der Stelle, wo sie gehalten wird, der Stelle, wo sie gestrichen wird, sowie auch davon, ob sie stärker oder schwächer, langsamer oder schneller gestrichen wird. Auf derselben Scheibe ist stets die Figur desto einfacher, je tiefer der Ton ist, durch welchen sie erzeugt wird. Es ist schon öfter darauf hingewiesen worden, daß die Linien, durch welche die Klangfiguren gebildet werden, nie grade Linien sind, sondern stets Curven, und daß an den Stellen, wo 2 Knotenlinien zusammentreffen, nie reine Durchschnittspunkte beobachtet werden, sondern daß dort der Sand sich immer über ein ganzes Flächenstück verbreitet. In Beziehung hierauf bemerkt Oersted (der mechanische Theil der Naturlehre, p. 287): „Bei allen diesen Versuchen zeigt es sich, daß der Sand nicht blos die Knotenlinien bedeckt, sondern auch einen Theil der Fläche zu beiden Seiten derselben, da nämlich die Theile der schwingenden Scheibe, welche in ihrer Nähe sind, und also kürzere Schwingungen machen, nicht Bewegung genug haben, den Sand von sich zu werfen. Dieser Mangel an Kraft, den Sand abzuwerfen, tritt noch stärker in der Nähe der Durchschnittspunkte der Knotenlinien hervor, wo eine noch größere Fläche mit Sand bedeckt bleibt, und das ist der Grund, weßhalb die Klangfiguren niemals gerade Linien zeigen, sondern der Sand sich in krummen Grenzen um die Knotenlinien her anordnet, welche krumme Linien ich als Hyperbeln erfunden habe, deren Asymptoten die Knotenlinien sind."

§. 139. **Schwingungen gekrümmter Scheiben.** 1) Nimmt man eine Glasglocke, die umgekehrt auf ein Brett befestigt ist, oder ein großes Glas mit einem Fuße, gießt es ungefähr halb voll Wasser, und bestreicht den Rand mit einem Violinbogen, so wird man bemerken, daß das Wasser gewöhnlich an vier von einander gleichweit entfernten Orten in eine zitternde Bewegung geräth. War auf das Wasser Bärlappsamen gestreut worden, so sammelt sich dieser so, daß er eine viereckige Figur darstellt. Dasselbe geschieht, wenn man entweder eine Stelle des Randes oder zwei einander gegenüberliegende leise mit dem Finger berührt, und 45° von einer der

Digitized by Google

berührten Stellen entfernt den Rand streicht. Streicht man dagegen nur 30° von einer der berührten Stellen, so bildet der Bärlappsamen eine sechseckige Figur, indem er durch die zitternde Bewegung des Wassers an 6 von einander gleichweit entfernten Stellen von dem Rande der Glocke zurückgeworfen wird. 2) Wenn man eine ziemlich lange, und nicht zu enge Glasröhre in der Mitte faßt, horizontal hält, und die eine Hälfte mit einem feuchten Lappen der Länge nach reibt, während man an die andere Hälfte einen kleinen, leichten Papierring hängt, so gleitet dieser Ring fort bis zu einer bestimmten Stelle, wo er stehen bleibt, und zu welcher er immer wieder zurückkehrt, wenn man ihn auch von derselben entfernt. Bezeichnet man diese Stelle, und dreht dann die Röhre ein wenig in der Hand, so wird jetzt der Ring nach einem anderen Punkte hin versetzt. Werden die verschiedenen Punkte alle, in welchen der Ring bei der Drehung zur Ruhe kam, mit einander verbunden, so zeigt sich, daß die Knotenlinie, welche auf diese Weise sichtbar gemacht wird, eine Art unregelmäßiger Schraubenlinie ist mit sehr gedehnten Windungen.

Aus dem ersten Versuch geht hervor, daß auch die gekrümmten Scheiben nie als Ganzes schwingen. Da aus der Bewegung des Wassers ersichtlich ist, daß immer einem ruhenden Punkte des Randes ein anderer gerade gegenüber liegt, so müssen sich also die Knotenlinien alle in dem Griffe oder Knopfe der Glocke durchschneiden. Die Schwingungen einer Glocke oder eines anderen runden Gefäßes sind also ganz so beschaffen, wie die Schwingungen einer runden Scheibe, bei welcher sich sternförmige Figuren zeigen. Warum bei einer Entfernung von 45° von der berührten Stelle 2 Knotenlinien, dagegen bei einer Entfernung von nur 30° 3 Knotenlinien entstehen, hat darin seinen Grund, daß da, wo die Glocke mit dem Bogen gestrichen wird, sie offenbar in die heftigste Schwingung gerathen muß, die Stelle der stärksten Schwingung aber natürlich grade in der Mitte zwischen 2 Knotenlinien liegen muß. Alle Schwingungen der Scheiben, der ebenen sowohl, wie der gekrümmten, welche wir bisher kennen gelernt haben, waren Transversalschwingungen. In dem zweiten Versuche jedoch sehen wir an einer gekrümmten Scheibe, der Glasröhre, auch Längenschwingungen auftreten. Freilich werden die Röhren von Vielen zu den Stäben gerechnet, aber grade das Auftreten der Knotenlinien statt der Schwingungsknoten dürfte die Stelle, die ihnen hier angewiesen worden ist, rechtfertigen.

Zweites Kapitel.

Von den tönenden Schwingungen der Luft.

§. 140. **In den Blasinstrumenten ist die Luft der schallende Körper.** Wenn man einen tönenden festen Körper mit der Hand berührt, so wird der Ton verändert, und wenn man den Körper festhält, so hört der Ton ganz auf. Wenn man dagegen ein Blasinstrument an beliebigen Stellen oder selbst in seiner ganzen Oberfläche festhält oder umwickelt, so dauert der Ton doch unverändert fort. Aus diesen Erfahrungen schließt man im ersten Fall aus dem Aufhören des Tones, daß, da der Ton nur die Folge von regelmäßigen Schwingungen des tönenden Körpers ist, durch die Berührung oder das Festhalten der Körper in seinen Schwingungen gestört

Digitized by Google

worden ist. Dasselbe müßte demnach auch im zweiten Fall eintreten, wenn der feste Körper des Blasinstrumentes der schwingende, also tönende wäre. Der Ton dauert aber fort, und kann daher nicht durch Schwingungen des festen Körpers erzeugt werden. Zu demselben Schlusse wird man geführt, wenn man findet, daß die Verschiedenheit der Dicke des Durchmessers und die Materie gar keinen Einfluß auf die Bestimmung der Töne hat, ja daß man solche Instrumente sogar aus Stoffen verfertigen kann, die wegen ihres sehr geringen Grades von Elasticität gar nicht geeignet sind, in eine schwingende Bewegung zu gerathen (Zinn, Blei). Es bleibt also Nichts übrig, als die in der Röhre befindliche Luftsäule selbst als den tönenden Körper zu betrachten. Dazu ist sie auch ganz besonders wegen ihres ausgezeichnet hohen Grades von Elasticität geeignet, die sie fähig macht, sehr leicht in regelmäßige Schwingungen versetzt zu werden. Grade weil die Luft elastisch ist, wirkt jeder auf sie ausgeübte Stoß nicht nur bewegend, sondern auch zusammendrückend auf die getroffenen Theilchen; so bald aber der Stoß zu wirken aufhört, suchen die zusammengedrückten Theile ihr früheres Volumen wieder einzunehmen, und bewegen sich demnach in entgegengesetzter Richtung wieder zurück, d. h. sie nehmen eine schwingende Bewegung an.

§. 141. **Verschiedene Mittel, die Luft in schwingende Bewegung zu versetzen.** Die verschiedenen Mittel, deren man sich bedient, um die in einem Blasinstrumente befindliche Luftsäule in tönende Schwingungen zu versetzen, sind folgende: 1) Man bläst einen Luftstrom durch eine enge Oeffnung gegen dieselbe. Dies geschieht bei den Waldhörnern, Posaunen, Trompeten u. s. w. 2) Man läßt einen eingeblasenen Luftstrom sich an einer scharfen Kante brechen, wie dies bei den gewöhnlichen Pfeifen der Kinder, dem Flageolet, der Flöte, denjenigen Orgelpfeifen, welche Labialpfeifen (labium, die Lippe; Lippenpfeifen) oder Flötenwerke genannt werden, u. s. w. der Fall ist. Nähere Erläuterung der Labialpfeifen; Fuß, Kern, Windloch, Aufschnitt mit dem oberen und unteren Labium, offene und gedeckte Labialpfeifen. 3) Man versetzt durch einen Luftstrom, welchen man durch eine Spalte bläst, ein elastisches Plättchen in Schwingungen, wodurch durch dasselbe die Oeffnung abwechselnd geöffnet und geschlossen wird, und so auf die Luft in der Röhre regelmäßig auf einander folgende Stöße ausgeübt werden. Das Plättchen heißt die Zunge, weßhalb wohl auch alle Blasinstrumente, welche auf diese Weise zum Tönen gebracht werden, Zungenpfeifen genannt werden. Die Zunge schlägt bei ihren Schwingungen entweder gegen die Ränder der Oeffnung an, oder sie oscillirt in der Oeffnung, so daß sie dieselbe nur in dem Momente ihrer Gleichgewichtslage verschließt; Zungenpfeifen mit aufschlagender und mit durchschlagender Zunge. Zu den Zungenpfeifen gehören die Clarinetten, Hoboen, Fagotten, diejenigen Orgelpfeifen, welche man Rohrwerke oder Schnarrwerke (wegen des schnarrenden Klanges ihrer Töne) nennt, die kleinen blechernen Trompeten und Hörner der Kinder u. s. w. Da die Höhe des Tons auch durch die Geschwindigkeit der Schwingungen der Zunge bedingt ist, diese aber desto schneller schwingt, je kürzer sie ist, so hat man in den Rohrwerken eine eigene Vorrichtung, die Krücke, um die Zunge verlängern oder verkürzen zu können. 4) Man läßt einen schon in Schwingungen befindlichen Körper auf die Luft in der Röhre einwirken.

Digitized by Google

So fängt eine Orgelpfeife an zu tönen, wenn man eine schwingende Stimmgabel, welche denselben Ton, wie die Orgelpfeife gibt, vor die Mündung derselben hält.

Die Luftsäule in einer Röhre wird auch in tönende Schwingungen versetzt, wenn man Wasserstoffgas in einem Gefäße erzeugt, das aus einer feinen Spitze ausströmende Gas anzündet, und dann eine Röhre über die Flamme schiebt (chemische Harmonica). Hier verbindet sich der Sauerstoff der Luft mit dem Wasserstoff zu Knallgas, und die schnell auf einander folgenden Verpuffungen desselben üben auf die Luftsäule die Stöße aus, durch welche sie in Schwingungen geräth.

Zu den Zungenpfeifen, und zwar zu denen mit durchschlagender Zunge, kann auch das Stimmorgan des Menschen gerechnet werden. Die Hauptbestandtheile desselben sind die Luftröhre, der Kehlkopf, und der Raum von dem Kehlkopf bis zur Mundöffnung. Die erstere ist dem Windrohr zu vergleichen, der zweite dem Mundstück, und der dritte ist dann die eigentliche Pfeife. Die Lunge dient als Blasebalg. Von diesen Theilen ist zur Hervorbringung der Töne am wichtigsten, und zu gleicher Zeit seinem Baue nach am verwickeltsten der Kehlkopf, weßhalb wir ihn hier etwas näher kennen lernen wollen. Der Kehlkopf schließt sich an den oberen Theil der Luftröhre an, und ist gewissermaßen die Fortsetzung derselben. Er wird gebildet durch 4 Knorpelstücke, die theils unter einander verbunden sind, theils mit dem obersten Ringe der Luftröhre zusammenhängen (Ringknorpel, Schildknorpel und die beiden Giesskannenknorpel). Der innere Raum des Kehlkopfs verengt sich von Unten nach Oben, so daß endlich nur noch eine von Vorn nach Hinten gerichtete Spalte, die Stimmritze (glottis) offen bleibt. Die Ränder dieser Spalte werden von 2 halbkreisförmigen, sehr elastischen Häutchen gebildet, Stimmbänder, welche vorn beide an den Schildknorpel, hinten aber an je einen Giesskannenknorpel befestigt sind. Durch die Bewegung der an der Außenseite dieser Knorpel liegenden Muskel können die Stimmbänder gespannt und nachgelassen werden, wodurch natürlich die Stimmritze verengt und erweitert wird. Oberhalb der Stimmritze sind rechts und links 2 sackartige Höhlungen, die Morgagni'schen Ventrikeln, deren obere Ränder sich bis auf eine Spalte, die obere Stimmritze, nähern. Die obere Stimmritze und durch sie der ganze Kehlkopf kann durch den an dem hinteren Theile der Zunge angewachsenen Kehldeckel (epiglottis) verschlossen werden. Der Kehldeckel schließt sich jedesmal beim Essen und Trinken, und bewirkt dadurch, daß die Speisen und Getränke über die Luftröhre hinweg in die hinter derselben liegende Speiseröhre gelangen. Beim gewöhnlichen Athmen entsteht kein Ton, weil die Stimmbänder schlaff sind, und die Luft ohne Gewalt durch die weit geöffnete Stimmritze aus der Lunge austreten kann.

§. 142. **Stehende und fortschreitende Schwingungen.** 1) Beobachten wir die Schwingungen einer gespannten Saite, oder eines an einem Ende befestigten Stabes, so finden wir, daß alle Theilchen gleichzeitig in Bewegung gerathen, gleichzeitig den Ort ihrer größten Ausweichung erreichen, gleichzeitig anfangen zurückzuschwingen, und gleichzeitig die Gleichgewichtslage passiren. 2) Wenn man ein sehr langes und mürbes Seil, das man an dem einen Ende befestigt hat, am anderen Ende durch die eine Hand

Digitized by Google

schwach spannt, und ihm dann mit der andern Hand einen Schlag ertheilt, so entsteht an der getroffenen Stelle eine Vertiefung, und diese Vertiefung läuft nach und nach längs des ganzen Seiles fort.

Schwingungen der ersten Art nennt man *stehende Schwingungen*, Schwingungen dagegen, wie sie das Seil macht, bei welchen sich die Bewegung von Theilchen zu Theilchen fortpflanzt, jedes Theilchen zwar dieselben Vibrationen macht, wie das vorhergehende, aber die Bewegung später beginnt, heißen *fortschreitende Schwingungen*. Da nun die Schwingungen fester Körper, durch welche Töne erzeugt werden, wie wir gesehen haben, nur stehende Schwingungen sind, so war zu vermuthen, daß auch die Luft in den Blasinstrumenten die Töne nur durch stehende Schwingungen hervorbringe. Diese Vermuthung hat sich auch, wie aus den folgenden Paragraphen hervorgehen wird, vollständig bestätigt.

§. 143. **Die Luft in Blasinstrumenten schwingt longitudinal.** Betrachtet man die in §. 141 angeführten 4 Mittel, die Luftsäule in einem Blasinstrumente in Schwingungen zu versetzen, etwas näher, so zeigt sich als Gemeinsames derselben, daß sie auf die äußerste Schicht der Säule einen Stoß ausüben. AF (Fig. 28.) sei die Luftsäule, und auf die Schicht AA erfolge der Stoß, so wird durch den Stoß die Fläche AA sich nach BB zu bewegen. Sobald die Fläche AA anfängt sich zu bewegen, werden die an sie grenzenden Theilchen der Luftsäule vorwärts geschoben, und weil sie nicht plötzlich ausweichen können, werden sie auch noch zusammengedrückt. Dies hat dann die Verschiebung und Zusammendrückung einer nächsten Schicht zur Folge, so daß sich Verschiebung und Zusammendrückung von dem Ende A bis zu dem Ende F fortpflanzt, wobei aber jede Schicht um so später ihre Bewegung anfängt, je weiter sie von dem Anfange A der Luftsäule absteht. Nun wirkt aber eine Schicht auf die ihr an Masse gleiche nächstfolgende nur so lange bewegend, als ihre Geschwindigkeit die der letzteren noch übertrifft, also so lange, bis sie derselben die Hälfte ihrer Geschwindigkeit beigebracht hat. Sowie dies geschehen, wirkt dann die Elasticität der Luftschichten allein. Diese treibt nun die beiden Luftschichten aus einander, die erstere bewegt sich rückwärts, und verliert dadurch die noch übrige Hälfte ihrer ursprünglichen Geschwindigkeit, sie kommt also zur Ruhe; die letztere dagegen gewinnt dadurch auch noch die andere Hälfte der Bewegung, und pflanzt sie dann wieder auf gleiche Weise auf die nächstfolgende Schicht fort. Während die Schicht AA eine Schwingung vollendet, also bis zu dem Augenblicke, wo sie wieder in AA anlangt, wird ein Theil der Luftsäule eine nach F gehende Bewegung angenommen haben, und ein anderer unmittelbar vor diesem nach A hin liegender Theil wird sich in seiner rückgängigen Bewegung befinden. Gesetzt alle Theilchen zwischen C und E seien nach einer bestimmten Zeit in Folge der Schwingung der Schicht AA in Bewegung, so nennt man den Inbegriff dieser Theilchen eine *Welle*, die Theilchen zwischen D und E, welche sich nach F zu bewegen und sich in dem Zustande der Verdichtung befinden, den *Vordertheil*, und die Theilchen zwischen C und D, welche bereits rückwärts gehen, und sich im Zustande der Verdünnung befinden, den *Hintertheil* der Welle, die Entfernung CE aber

Fig. 28.

Digitized by Google

die Länge der Welle. Daß in CE nur die Lufttheilchen, welche in demſelben Querſchnitt liegen, eine gleiche Geſchwindigkeit haben, braucht nach dem Vorgange, wie er eben erläutert wurde, wohl nicht erſt erwähnt zu werden.

Da nun die Bewegung der Theilchen in der Richtung der Länge der Luftſäule erfolgt, und ſich nur in verſchiedenen Querſchnitten dadurch von einander unterſcheidet, daß ſie in verſchiedenen Augenblicken ihren Anfang nimmt, ſo ſind alſo die entſtandenen Schwingungen Longitudinalſchwingungen, und zwar fortſchreitende Schwingungen. Wir werden jedoch ſogleich ſehen, wie ſich aus dieſen fortſchreitenden Schwingungen ſtehende bilden.

§. 144. **Die durch die Schwingungen erzeugten Wellen werden an den Enden der Röhre zurückgeworfen.** Das Ende der die ſchwingende Luftſäule enthaltenden Röhre kann entweder offen oder geſchloſſen ſein. Nehmen wir zuerſt an, es ſei geſchloſſen. Sobald in einer ſolchen Röhre die Bewegung und dadurch bewirkte Zuſammendrückung der Lufttheilchen bis zu der verſchließenden Wand vorgerückt iſt, wird durch die Feſtigkeit der Wand alle weitere Bewegung nach Vorwärts aufgehoben. Die verdichteten anſtoßenden Theile wollen aber vermöge ihrer Elaſticität ihr urſprüngliches Volumen wieder einnehmen, bewegen ſich daher rückwärts, und ſtoßen dadurch auf die ſich ihnen entgegen bewegenden Theilchen, wodurch natürlich nur wieder eine Verdichtung erzeugt wird, die ſich dann nach der entgegengeſetzten Richtung fortpflanzt. Wenn alſo an der verſchließenden Wand eine verdichtende Welle anſchlägt, ſo wird durch die Zurückwerfung auch wieder eine ſolche in entgegengeſetzter Richtung hervorgerufen. Iſt nun aber das Ende der Röhre offen, ſo haben die verdichteten Lufttheilchen, ſobald ſie an der Oeffnung der Röhre ankommen, nicht nur Platz zum Ausweichen dadurch bekommen, daß ſie die grade vor ihnen liegenden Lufttheilchen zuſammendrücken, ſondern auch die ſeitwärts liegenden, und dieſe wieder alle umliegenden. Es wird demnach ein Theilchen an der Oeffnung einer Röhre bei einem gewiſſen Drucke, dem es ausgeſetzt iſt, in einem Zeittheilchen weiter ausweichen, als es, ſo lange es ſich in dem Innern der Röhre befand, bei dem nämlichen Drucke ausgewichen iſt. Die Folge davon kann aber keine andere ſein, als daß die Verdichtung in eine Verdünnung übergeht, die ſich dann wieder rückwärts weiter verbreitet, ſo daß alſo an einem offenen Ende eine ankommende verdichtende Welle ſich in eine rückwärts gehende verdünnende verwandelt.

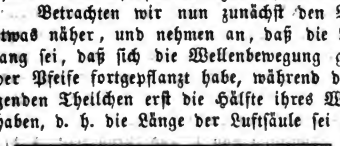
Würden in der Röhre AF (§. 143) die Schwingungen der Lufttheilchen dadurch hervorgerufen, daß vor AA eine Verdünnung der Luft erzeugt würde, ſo würden offenbar die einzelnen Schichten der Luftſäule nach und nach nicht eine Bewegung gegen F hin, ſondern gegen A hin annehmen, und dadurch würde am Ende F nicht eine Verdichtung, wie in dem bisher betrachteten Falle, ſondern eine Verdünnung entſtehen. Es kann aber auf ganz ähnliche Weiſe gezeigt werden, daß dann, ſobald die Bewegung ſich bis F fortgepflanzt hat, eine Bewegung von F ausgehend nach A hin erzeugt wird, die, wenn die Röhre bei F geſchloſſen iſt, ſich als eine verdünnende, und, wenn ſie offen iſt, als eine verdichtende Welle erweiſen wird. Durch Zurückwerfung an einem geſchloſſenen Ende behält alſo eine Welle ihre Eigenſchaft (verdichtend oder ver-

Digitized by Google

dünnend) bei, durch Zurückwerfung aber an einem offenen Ende nimmt sie den entgegengesetzten Charakter an.

§. 145. **Durch gegenseitige Einwirkung der directen und reflectirten Wellen werden die fortschreitenden Schwingungen in stehende verwandelt.** Kommt nun eine directe Welle mit einer zurückgeworfenen an irgend einer Stelle zusammen, so müssen drei Fälle unterschieden werden, es sind nämlich entweder beide Wellen verdichtend, oder beide verdünnend, oder die eine ist verdichtend und die andere verdünnend. Im ersten und zweiten Fall kann offenbar der Erfolg kein anderer sein, als daß die Verdichtung oder Verdünnung an der Stelle des Zusammentreffens vermehrt wird, und zwar so, daß die resultirende Verdichtung oder Verdünnung der Summe der Verdichtungen oder Verdünnungen, welche an der betreffenden Stelle in den einzelnen Wellen herrschen, gleich ist. Im dritten Falle aber muß durch das Zusammentreffen eines verdichteten und eines verdünnten Wellenstücks eine gänzliche oder theilweise Ausgleichung stattfinden, je nachdem Verdichtung und Verdünnung an dieser Stelle in beiden Wellen gleich oder ungleich stark ist. Die Lufttheilchen werden aber auch an der Stelle des Zusammentreffens zweier Wellen durch jede Welle in Bewegung gesetzt. Diese Bewegungen gehen nun entweder beide nach einerlei Richtung, oder sie gehen nach gerade entgegengesetzten Richtungen. Im ersteren Falle ist natürlich die Geschwindigkeit, die ein Theilchen in dem Momente des Zusammentreffens erhält, gleich der Summe der Geschwindigkeiten, welche es in jeder Welle einzeln haben würde, im letzteren Falle ist sie gleich der Differenz dieser Geschwindigkeiten, so daß das Theilchen, wenn beide Wellen ihm eine gleiche Geschwindigkeit ertheilen, sogar zur Ruhe kommt. Da die Schwingungen der Lufttheilchen durch dieselben Kräfte hervorgerufen werden, wie die Schwingungen der tönenden festen Körper, so müssen sie auch nach denselben Gesetzen erfolgen, welche wir bei den festen Körpern kennen gelernt haben, d. h. die Theilchen bewegen sich nach Vorwärts zuerst mit immer zunehmender, und dann mit immer abnehmender Geschwindigkeit, bis ihre Geschwindigkeit Null wird, dann bewegen sie sich ebenso nach entgegengesetzter Richtung. In den durch diese Schwingungen erzeugten Wellen müssen natürlich dieselben Verhältnisse der Bewegung stattfinden. Die Theilchen in dem Vordertheil sowohl, wie die in dem Hintertheil bewegen sich desto schneller, je näher sie sich der Mitte des Vorder- oder des Hintertheils befinden, und die Geschwindigkeit der Theilchen an den äußersten Grenzen des Vorder- oder Hintertheils ist gleich Null.

Betrachten wir nun zunächst den Vorgang in einer gedeckten Pfeife etwas näher, und nehmen an, daß die Länge der Pfeife gerade nur so lang sei, daß sich die Wellenbewegung gerade durch die ganze Luftsäule der Pfeife fortgepflanzt habe, während die dem offenen Ende zunächst liegenden Theilchen erst die Hälfte ihres Weges nach Vorwärts zurückgelegt haben, d. h. die Länge der Luftsäule sei gleich $\frac{1}{4}$ Wellenlänge.



ab (Fig. 29) sei die gedeckte Pfeife. Wir wollen nun zuerst den Zustand der Luft für den Moment untersuchen, in welchem das maximum der Dichtigkeit an dem geschlossenen Ende b anlangt, in welchem sich also, wenn bei b keine Wand und die Pfeife länger wäre, bereits

Digitized by Google

eine halbe Welle gebildet hätte. Es iſt dies der Moment, in welchem die Theilchen bei a ihre Bewegung nach Rechts gerade vollendet, die Theilchen bei b, wenn keine Wand da wäre, ihren halben Weg nach Rechts zurückgelegt haben, und, wenn bc = ab iſt, die Theilchen bei c eben erſt anfangen, ſich zu bewegen. Durch die Wand iſt aber in dieſem Momente der Theil der Welle, welcher ſich von b nach c fortpgeſtanzt hätte, ſchon zurückgeworfen, und durch die Zurückwerfung werden die verſchiedenen Theilchen gerade ſo in entgegengeſetzter Richtung afficirt, wie es bei den entſprechenden, gleichweit rechts von b gelegenen der Fall geweſen wäre, wenn ſich die Welle ungehindert von b nach der rechten Seite hin hätte verbreiten können. Nun würden die auf beiden Seiten b zunächſt liegenden Theilchen am ſtärkſten verdichtet ſein, die Verdichtung würde aber deſto mehr abnehmen, je weiter die Theilchen rechts und links von b entfernt ſind. Durch das Zuſammenwirken der directen und zurückgeworfenen Welle muß ſich alſo in dieſem Momente die Luftſäule in der Röhre ab in dem Zuſtande der Verdichtung befinden, die von a an, wo ſie gleich Null iſt, bis nach b hin immer mehr zunimmt. Da aber alle gleichweit rechts und links von b liegenden Theilchen eine gleiche Geſchwindigkeit hätten, die Richtung der Bewegung aber durch die Zurückwerfung gerade die entgegengeſetzte wird, ſo müſſen in dem angenommenen Momente alle Theilchen der Luftſäule ab momentan im Zuſtande der Ruhe ſein. Im nächſten Moment fangen ſämmtliche Theilchen der Luftſäule ab eine rückgängige Bewegung von b nach a zu an. Denn eben waren die beiden Geſchwindigkeiten nach entgegengeſetzten Richtungen einander gleich, und hoben ſich deßhalb einander auf, ſie bleiben ſich aber im nächſtfolgenden Momente nicht mehr gleich. Wenn keine Wand da wäre, würde nämlich die Geſchwindigkeit der Theilchen zwiſchen b und c wachſen, dagegen diejenige der Theilchen zwiſchen a und b abnehmen. Dieſes Verhältniß wird aber durch die Wand nur dahin abgeändert, daß durch die Zurückwerfung die Richtung der Bewegung die entgegengeſetzte wird. Nach einer weiteren ¼ Schwingung kommen ſie alſo alle wieder in ihre Gleichgewichtslage, die ſie aber mit dem maximum der Geſchwindigkeit vermöge des Beharrungsvermögens noch in der Richtung nach a zu paſſiren. Wir wollen nun noch den Moment betrachten, in welchem das maximum der Verdünnung bei b anlangt, in welchem ſich alſo, wenn die Röhre lang genug wäre, die ganze Welle gebildet hätte. Durch ganz ähnliche Schlüſſe, wie oben, finden wir, daß in dieſem Momente die Theilchen der Luftſäule ab ſich in dem Zuſtande der Verdünnung, die von b nach a hin abnimmt, befinden, ſo daß ſie bei a in ihrem natürlichen Zuſtande ſind, ferner daß auch in dieſem Momente die Bewegung momentan gleich Null iſt, daß die Theilchen aber in dem nächſten Momente wieder anfangen müſſen, ſich alle nach b hin zu bewegen. Aus dieſer Darſtellung geht alſo hervor, daß durch das Zuſammenwirken der directen und zurückgeworfenen Wellen die urſprünglich fortſchreitenden Schwingungen ſich in ſtehende verwandelt haben, ſowie daß die Theilchen am offenen Ende den Zuſtand ihrer natürlichen Dichtigkeit faſt gar nicht verändern, wenn ſie gleich zeitweiſe in ſtarke Bewegung gerathen, daß aber die abwechſelnde Verdichtung und Verdünnung deſto größer wird, je weiter die Theilchen nach b zu liegen.

Digitized by Google

§. 146. **Die Luftsäule in einer gedeckten Pfeife kann sowohl als Ganzes, als in aliquoten Theilen schwingen.** In dem Falle, welchen wir in dem vorhergehenden Paragraph angenommen hatten, nämlich daß die Länge der Luftsäule $= \frac{1}{2}$ Wellenlänge sei, sahen wir dieselbe als Ganzes schwingen. Wir wollen nun annehmen, die Länge der Luftsäule sei $= \frac{3}{4}$ Wellenlänge.

Fig. 30.

Denken wir uns zunächst die Länge der gedeckten Pfeife ad (Fig. 30) in drei gleiche Theile, ab, bc und cd getheilt, so daß die Länge jedes Theils $= \frac{1}{4}$ Wellenlänge ist, denken uns ferner die Pfeife noch einmal um ihre eigene Länge da' $=$ ad verlängert, so daß auch dc', c'b' und b'a' jedes $= \frac{1}{4}$ Wellenlänge ist, und sehen wir vorerst wieder von der Wand bei d ab. Nun muß in dem Momente, in welchem in a die größte Verdichtung eingetreten ist, in c, welches um $\frac{1}{4}$ Wellenlänge davon entfernt ist, die größte Verdünnung, und ebenso in c' die größte Verdichtung, und in a' die größte Verdünnung stattfinden. Durch die Zurückwerfung wird aber c' mit c, und a' mit a zusammenfallen, in c und a müssen demnach Verdichtung und Verdünnung sich gegenseitig aufheben, d. h. die Theilchen sich in dem Zustande ihrer natürlichen Dichtigkeit befinden. Dies wird aber auch für jeden anderen Moment ebenfalls der Fall sein müssen, weil in a und a', sowie in c und c' wegen ihrer Entfernung um $\frac{1}{2}$ Wellenlänge stets die Verdichtung an der einen Stelle der Verdünnung an der anderen gleich sein muß. b und b' sind um eine ganze Wellenlänge von einander entfernt, und deßwegen befinden sich an beiden Stellen die Theilchen stets in demselben Zustande der Verdichtung oder Verdünnung. Durch die Zurückwerfung bei d fällt aber b' mit b zusammen, und es muß daher bei b die Verdichtung oder Verdünnung stets doppelt so groß sein, als sie ohne Zurückwerfung sein würde. In c und c', sowie in a und a' ist aber auch die Geschwindigkeit gleich, und nur der Richtung nach entgegengesetzt, durch die Zurückwerfung bei d werden daher die Richtungen auch gleich, und folglich erhalten dann die Theilchen bei c und a eine doppelt so große Geschwindigkeit; in b und b' ist zwar auch die Geschwindigkeit stets gleich, aber die Bewegung erfolgt nach derselben Richtung, durch die Zurückwerfung dagegen wird die Richtung in die entgegengesetzte verwandelt, und deßwegen müssen dann die Theilchen bei b stets in Ruhe verharren. Bei b ist demnach ein Schwingungsknoten entstanden, während gerade hier Verdichtung und Verdünnung am größten wird. Bei a und c aber findet weder Verdichtung, noch Verdünnung statt, die Theilchen bewegen sich jedoch gerade hier mit der größten Geschwindigkeit; man nennt solche Stellen Schwingungsbäuche. Auf dieselbe Weise läßt sich zeigen, daß, wenn die Länge der Luftsäule gleich $\frac{3}{4}$, $\frac{7}{4}$ u. s. w. Wellenlänge ist, sich zwei, drei u. s. w. Schwingungsknoten bilden müssen. Bei zwei Schwingungsknoten liegen dieselben um $\frac{1}{3}$ und $\frac{2}{3}$ der Länge von dem offenen Ende entfernt, bei drei Schwingungsknoten um $\frac{1}{5}$, $\frac{3}{5}$ und $\frac{5}{5}$ u. s. w. Wir finden also hier wieder dasselbe Gesetz, wie bei den schwingenden Stäben, daß nämlich der dem freien Ende nächste Schwingungsknoten von diesem freien Ende nur halb so weit entfernt ist, als die

Digitized by Google

Entfernung eines Schwingungsknotens von dem anderen, oder eines Schwingungsknotens von dem festen Ende.

§. 147. Die Luftsäule einer offenen Pfeife schwingt nur in aliquoten Theilen. Bringt man eine offene und eine gedeckte Pfeife von ganz gleicher Länge zum Tönen, so geben sie doch nicht denselben Ton, sondern stets gibt die offene Pfeife den höheren Ton (die Octave von demjenigen, welchen die gedeckte Pfeife gibt, vergl. §. 149). Wenn aber eine offene und eine gedeckte Pfeife denselben Ton erzeugen, so ist stets die offene genau doppelt so lang, wie die gedeckte.

Schon aus dieser Erfahrung läßt sich schließen, daß die Luftsäule der offenen Pfeife nicht als Ganzes schwingen kann, sondern daß sich Schwingungsknoten gebildet haben müssen. Wir wollen nun die Anzahl und Lage dieser Schwingungsknoten näher zu ermitteln suchen. Weil aber bei gleichem Tone, wie eben aus der Erfahrung bemerkt wurde, eine offene Pfeife doppelt so lang sein muß, wie eine gedeckte, im Falle beide ihre tiefsten Töne hervorbringen, so wollen wir mit Rücksicht auf §. 145 eine Pfeife von der Länge voraussetzen, daß die schwingende Luftsäule in derselben $= \frac{1}{4}$ Wellenlänge ist. Nehmen wir hier zuerst den Moment, in welchem sich die ganze Welle gebildet hätte, wenn die Röhre lang genug wäre, so hat sich in der Röhre vermöge der directen Welle gerade der verdünnende Theil vollständig gebildet, und der vorangegangene verdichtende Theil ist vollständig als verdünnender zurückgeworfen.

Fig. 31.

Die Theilchen in der Röhre ab (Fig. 31) müssen sich also alle in dem Zustande der Verdünnung befinden, und zwar muß diese in der Mitte am größten sein, und nach den beiden Enden a und b hin abnehmen, so daß sie sich in a und b selbst in ihrem natürlichen Zustande befinden. Die zusammenfallenden Theilchen aus der directen und reflectirten Welle haben aber in diesem Momente auch eine gleiche Geschwindigkeit, nur wollen sie sich vermöge der directen Welle nach a hin, und vermöge der reflectirten nach b hin bewegen. Da sie demnach nach zwei entgegengesetzten Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit getrieben werden, so kommen sie augenblicklich zur Ruhe. In dem unmittelbar darauf folgenden Momente aber fängt bei a sich wieder ein verdichtender Theil zu bilden an, und die schon bei b reflectirte Welle wird jetzt auch wiederum bei a als verdichtender Theil reflectirt, wodurch die Theilchen bei a eine Bewegung mit vermehrter Geschwindigkeit nach b hin erhalten; die Theilchen, welche bei b ankommen, werden hier ebenfalls als verdichtender Theil reflectirt, und bekommen dadurch eine Bewegung nach a hin, also eine Bewegung in derselben Richtung, welche die Theilchen haben, die noch nicht in b angekommen sind, wodurch natürlich auch nur eine Bewegung mit vermehrter Geschwindigkeit entstehen kann. Die Theilchen bewegen sich also jetzt von a und b aus nach der Mitte zu. In der Mitte selbst aber kann auch jetzt keine Bewegung entstehen, weil noch immer die gerade da befindlichen Lufttheilchen zu entsprechenden Stellen der directen und reflectirten Welle gehören, also durch die eine ebenso stark nach a, wie durch die andere nach b hin gezogen werden. Nach einer abermaligen halben Schwingungsdauer wird sich nun in der Röhre der verdichtende Theil vollständig aus-

Digitized by Google

gebildet haben, und der vorangegangene verdünnende Theil wird vollständig als verdichtender Theil reflectirt sein, deßwegen werden jetzt die Lufttheilchen der Röhre sich alle in dem Zustande vergrößerter Verdichtung befinden, die wieder in der Mitte am größten ist, und nach beiden Enden hin abnimmt, wo sie zu Null wird. Ganz wie oben wird nun gezeigt, daß auch in diesem Momente die Lufttheilchen sämmtlich in Ruhe sind, daß sie aber unmittelbar darauf eine Bewegung nach a und b zu annehmen. So geht es denn fort und fort. Wir sehen also, daß sich in der Mitte der Röhre ein Schwingungsknoten gebildet hat, und daß hier die abwechselnden Verdünnungen und Verdichtungen ihr maximum erreichen, während die Lufttheilchen an den beiden offenen Enden stets in ihrem natürlichen Zustande verharren, also Schwingungsbäuche sind.

Ist die Länge der Röhre in Beziehung auf den Ton, welchen sie hervorbringen soll, = 1 Wellenlänge dieses Tones, so läßt sich ebenso zeigen, daß sich dann zwei Schwingungsknoten, ist sie $\frac{3}{2}$ Wellenlänge des Tones, daß sich drei Schwingungsknoten bilden müssen. Auch gibt die Untersuchung in diesem Falle wieder dasselbe Gesetz für die Entfernung der Schwingungsknoten von einander und die Entfernung eines Schwingungsknotens von einem freien Ende, wie wir es in dem vorhergehenden Paragraph kennen gelernt haben. Bei zwei Schwingungsknoten liegt also jetzt je einer $\frac{1}{4}$ Wellenlänge von dem nächsten Ende entfernt, während ihre gegenseitige Entfernung = $\frac{1}{2}$ Wellenlänge ist.

Um die Schwingungsknoten einer Luftsäule sichtbar zu machen, nimmt man nach Hopkins eine etwa $1\frac{1}{2}$ Zoll weite Glasröhre. Die Röhre befindet sich vertical über einer Glasplatte, welche, mit dem Bogen bestrichen, einen der Röhre entsprechenden Ton gibt, und durch deren Schwingungen auch die Luft in der Röhre in schwingende Bewegung gesetzt wird. An einem Faden wird ein mit einer dünnen Membrane überzogener, kleiner Metallrahmen, nachdem man auf die Membrane feinen Sand gestreut hat, eingelassen. Sobald man zu einer Stelle gelangt, wo sich ein Schwingungsknoten befindet, bleibt der Sand in Ruhe, an allen übrigen Stellen, am stärksten an den Schwingungsbäuchen, geräth er in mehr oder weniger heftige Bewegung.

§. 148. **Instrumente, durch welche die Luft in tönende Schwingungen versetzt wird, ohne in Röhren eingeschlossen zu sein.** Bei den in der Musik gebräuchlichen Instrumenten, bei welchen die Luft der tongebende Körper ist, ist dieselbe stets durch Röhren begrenzt. Man hat indeß auch zu anderen Zwecken, namentlich um die einem Tone zugehörige Schwingungszahl bestimmen zu können, Apparate construirt, bei welchen durch die Luft Töne erzeugt werden, ohne daß sie durch eine Röhre begrenzt ist. Die einfachste derartige Vorrichtung ist von Seebeck angegeben. Sie besteht aus einer um eine wagrechte Are drehbare Scheibe, auf welcher sich in gleichen Abständen von einander eine Anzahl Löcher von etwa zwei Linien Durchmesser in einer mit dem Umkreise parallelen Reihe befinden. Wird die Scheibe in schnelle Drehung versetzt, und bläst man mit einer Röhre, deren Mündung etwas enger ist, als die Löcher, senkrecht gegen die Scheibe, und zwar so, daß der Luftstrom gegen die Löcherreihe gerichtet ist, so entsteht ein Ton, der um so höher wird, in je schnellere Drehung die Scheibe versetzt wird. Dasselbe Instrument, nur in sehr

Digitized by Google

vervollkommneter Gestalt, ist die Sirene von Caignard Latour. Die Luft strömt hier in einen Cylinder, dessen obere Deckplatte nahe der Peripherie derselben durch eine Anzahl gleichweit abstehender Oeffnungen schief durchbohrt ist. Die aus diesen Oeffnungen ausströmende Luft trifft gegen eine um ihren Mittelpunkt, der mit dem Mittelpunkte der oberen Deckplatte des Cylinders zusammenfällt, drehbare Scheibe mit einer gleichen Anzahl Durchbohrungen, die aber auch nicht grade durch die Scheibe hindurchgehen, sondern gegen die Durchbohrungen der Deckplatte eine entgegengesetzte Richtung haben. Die gegen die dadurch gebildeten schiefen Ebenen stoßende Luft setzt die Scheibe in Bewegung. Die Luft strömt durch, so oft die Löcher der Scheibe über die Löcher der Deckplatte zu stehen kommen, in den übrigen Stellungen dagegen wird sie gehemmt. Die Are der drehbaren Scheibe setzt noch ein Zählerwerk in Bewegung, durch welches die Anzahl der Umdrehungen gemessen wird. Die Scheibe dreht sich natürlich desto schneller, je stärker der eingeblasene Luftstrom ist; desto höher ist aber auch hier wieder der Ton. Abweichend von diesen beiden Apparaten, doch ganz auf demselben Principe beruhend ist die von Savart angegebene Radsirene. Der Hauptbestandtheil derselben ist ein gezahntes Rad, das bei der Umdrehung um seine Are mit den Zähnen gegen eine elastische Feder schlägt. Um die Umdrehungsgeschwindigkeit des Rades, und dadurch, sowie durch die Anzahl der Zähne des Rades, die in einer Secunde erfolgende Anzahl der Stöße gegen die elastische Feder messen zu können, ist mit der Are ein ähnliches Zählerwerk, wie bei der Sirene von Caignard Latour, verbunden. Daß auch hier der entstehende Ton desto höher wird, je schneller das Rad gedreht wird, braucht wohl nicht erst erwähnt zu werden.

Die hier beschriebenen Apparate beweisen, daß durch regelmäßig wiederkehrende Stöße gegen die Luft ein Ton entsteht, und daß dieser Ton um so höher ist, je mehr solcher Stöße in einer Secunde erfolgen. In dem Seebeck'schen Apparat geht der dagegen geblasene Luftstrom durch eine Oeffnung nach der anderen. Dadurch wird eine Verdichtung und Verdünnung der Luft hervorgebracht, also eine Welle, welche dem Hin- und Hergange einer schwingenden Saite entspricht. Gesetzt die Scheibe habe 48 Löcher, und drehe sich 3mal in einer Secunde um, so muß demnach derselbe Ton entstehen, den eine gespannte Saite gibt, welche in der Secunde 3×48 oder 144 Schwingungen macht. Bei dem zweiten Apparate werden, so oft die Löcher der Scheibe und der Deckplatte über einander stehen, der Luft so viele Stöße ertheilt, als Löcher in jeder Platte vorhanden sind, allein die dadurch gebildeten Wellen entstehen und verschwinden in demselben Momente. Diese Vervielfachung kann demnach keine Erhöhung des Tones, sondern nur eine Verstärkung desselben bewirken. Der Ton muß ganz derselbe bleiben, wenn man auch der Deckplatte nur eine einzige Durchbohrung statt ebenso viele, wie der Scheibe, gibt. Die größere Anzahl der Durchbohrungen der Deckplatte hat aber auch noch den weiteren Vortheil, daß dadurch auch eine größere bewegende Kraft für die Scheibe erzielt wird. In dem dritten Apparate endlich wird die abwechselnde Verdichtung und Verdünnung der Luft nicht durch die von einem Luftstrome erzeugten Stöße hervorgebracht, sondern durch das in gleichen Zeitabständen erfolgende Hin- und Herschwingen der elastischen Feder.

Digitized by Google

Hierher dürfte wohl auch das Trevelyan'ſche Inſtrument gerechnet werden. Es beſteht aus einem Stabe von Kupfer, dem Wieger, der in einen runden, dünnen Stiel ausläuft, und auf ſeiner erhabenen Fläche eine Längenfurche hat, ſo daß er eine Unterlage nur an den Rändern dieſer Furche berührt. Nachdem derſelbe ſtark erhitzt iſt, wird er auf ein oben abgerundetes, friſch geſchabtes Stück Blei gelegt. Der Wieger ſchwankt dann ziemlich raſch hin und her, indem er da, wo er mit dem Blei in Berührung kommt, demſelben Wärme mittheilt, und dadurch eine Ausdehnung, alſo eine Erhöhung des Bleies an dieſer Stelle hervorruft, und indem dadurch der Wieger ſeitwärts fällt, worauf die Erhöhung des Bleies ſich verliert, während ſie nun auf der anderen Seite entſteht u. ſ. f. Durch dieſes abwechſelnde Hin- und Herſchwanken des Wiegers werden der umgebenden Luft in raſcher Aufeinanderfolge Stöße ertheilt, die dann den Ton hervorbringen.

Drittes Kapitel.

Von den durch ſtehende Schwingungen erzeugten Tönen.

§. 149. **Die diatoniſche Tonleiter.** Wenn man eine geſpannte Saite nach und nach immer mehr um ein Weniges verkürzt, ſo wächſt nach §. 132 die Anzahl der Schwingungen in der Secunde immer mehr, und dadurch wird auch bei jeder neuen Verkürzung der Ton immer höher. Setzen wir die Verkürzung ſo weit fort, daß wir endlich nur noch die halbe Länge der Saite ſchwingen laſſen, daß alſo jetzt die Saite in einer Secunde noch einmal ſo viele Schwingungen macht, als wenn ſie in ihrer gangen Länge ſchwingt, ſo wird ein Ton gehört, der mit dem Tone der in ihrer ganzen Länge ſchwingenden Saite ſo ſehr übereinſtimmt, daß man, wenn beide zuſammen gehört werden, nur einen einzigen Ton zu vernehmen glaubt. Unter den zwiſchen beiden Tönen liegenden unzählig vielen Tönen gibt es aber auch noch 6, welche, mit ihnen in natürlicher Ordnung gehört, dem Ohre eine gewiſſe Befriedigung gewähren. Daſſelbe Reſultat ergibt ſich auch, wenn wir 2 Orgelpfeifen haben, von welchen die eine grade halb ſo lang, wie die andere iſt, und außer denſelben noch eine ganze Reihe anderer Orgelpfeifen, deren Längen aber zwiſchen die Längen obiger 2 fallen. Die Folge dieſer 8 Töne nennt man eine Octave (octo, acht), den tiefſten derſelben den Grundton oder, wenn auf die Ordnung in der Reihenfolge geſehen wird, die Prim (prima sc. tonica, der erſte durch Spannung erzeugte Ton), wo dann die folgenden die Secund, Terz, Quart, Quint, Sext, Septime und Octav genannt werden. Von der Octav an erhält man dann wieder eine ganz ähnliche Tonreihe bis zur nächſt höheren Octav u. ſ. f. Eine Aufeinanderfolge von Tönen aber, welche nach einem beſtimmten Geſetze immer höher werden, heißt eine Scale (scala, die Leiter) oder Tonleiter, und die Aufeinanderfolge der hier beſchriebenen Töne insbeſondere die diatoniſche Tonleiter [weil ſie διὰ τόνων, d. h. durch die (ganzen) Töne geht]. Man bezeichnet gewöhnlich den Grundton dieſer Tonleiter mit C, und dann die Secunde, Terz u. ſ. w. mit D, E, F, G, A, und H. Die Octave bekommt dann wieder denſelben Namen, wie der Grundton, nur c ſtatt C, überhaupt ſind alle entſprechenden Töne aller verſchie-

Digitized by Google

denen Octaven gleichnamig. Während die Töne der ersten höheren Octave mit den kleinen Buchstaben, diejenigen der zweiten höheren Octave mit denselben kleinen Buchstaben und einem kleinen Horizontalstrich über jedem, diejenigen der dritten höheren Octave ebenso, nur mit 2 Horizontalstrichen über jedem u. s. w. bezeichnet werden, bezeichnet man die Töne der ersten, zweiten u. s. w. tieferen Octave mit den entsprechenden großen Buchstaben und einem, zwei u. s. w. Horizontalstrichen unter denselben. Im Ganzen wird in der Musik gewöhnlich von 9 Octaven Anwendung gemacht, so daß

$\underline{\underline{\underline{C}}}$ der tiefste, $\overline{\overline{\overline{c}}}$ der höchste musikalische Ton ist.

Sehen wir nun näher zu, bei dem wievielten Theile der Länge der ganzen Saite unsere Töne entstehen, und setzen wir die Länge der ganzen Saite, welche den Ton C hervorbringt, $= 1$, so ist die Länge für $D = \frac{8}{9}$, für $E = \frac{4}{5}$, für $F = \frac{3}{4}$, für $G = \frac{2}{3}$, für $A = \frac{3}{5}$, für $H = \frac{8}{15}$ und für $c = \frac{1}{2}$, also lauter Längen, die zu der Länge der ganzen Saite in einem ganz einfachen, rationalen Verhältnisse stehen. Da sich nun die Schwingungszahlen umgekehrt wie die Längen verhalten, so ist das Verhältniß der Schwingungszahlen der einzelnen, auf einander folgenden Töne einer Octave zu derjenigen des Grundtons $\frac{9}{8}$, $\frac{5}{4}$, $\frac{4}{3}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{3}$, $\frac{15}{8}$ und 2, d. h. also, während der Grundton 8 Schwingungen macht, macht die Secunde deren 9, oder während der Grundton 3 Schwingungen macht, macht die Quart deren 4 u. s. w. Es geht zugleich hieraus hervor, daß, wenn man die wirkliche Anzahl von Schwingungen in einer Secunde, die erfordert werden, um einen dieser Töne, z. B. G, hervorzubringen, kennt, aus diesen Verhältnißzahlen auch die wirklichen Schwingungszahlen aller übrigen Töne leicht berechnen kann. Die oben beschriebenen Sirenen setzen uns aber vermittelst des mit ihnen verbundenen Zählerwerks in den Stand, auf eine einfache Art die absolute Schwingungszahl eines bestimmten Tones zu finden. Da die Höhe eines Tones, wie schon öfter bemerkt, einzig und allein von der Schwingungszahl abhängt, und deßwegen auch durch dieselbe am einfachsten gemessen wird, so nennt man die absolute Schwingungszahl eines Tones wohl auch seine absolute Tonhöhe, während unter der relativen Tonhöhe eines Tones das Verhältniß seiner Schwingungszahl zu derjenigen des Grundtones, also die eben angeführten Verhältnißzahlen $\frac{9}{8}$, $\frac{5}{4}$ u. s. w. verstanden werden. Das Zahlenverhältniß irgend zweier Töne aber nennt man ihr Intervall (intervallum, Zwischenraum); so ist also z. B. das Intervall zwischen E und A $= \frac{3}{5} : \frac{4}{5} = 15 : 20 = 1 : \frac{20}{15} = 1 : \frac{4}{3}$. Ist das erste Glied des Verhältnisses $= 1$, dann versteht man der Kürze wegen unter dem Intervall das zweite Glied des Verhältnisses, $\frac{4}{3}$ wäre also das Intervall zwischen E und A, d. h. A ist $\frac{4}{3}$mal höher, als E, oder wenn man die Schwingungszahl von E mit $\frac{4}{3}$ multiplicirt, so erhält man die Schwingungszahl von A.

Vergleichen wir nun die Töne einer Octave nicht alle mit dem Grundtone, sondern jeden mit dem nächst höheren, d. h. suchen wir die Intervalle von je 2 auf einander folgenden Tönen einer Octave, so ist das Intervall zwischen C und D $= \frac{9}{8}$, zwischen D und E $= \frac{10}{9}$, zwischen E und F $= \frac{16}{15}$, zwischen F und G $= \frac{9}{8}$, zwischen G und A $= \frac{10}{9}$, zwischen A und H $= \frac{9}{8}$, und zwischen H und c $= \frac{16}{15}$. Wir sehen also, daß diese Intervalle nicht alle gleichen Werth haben, sondern 3 verschiedene

Digitized by Google

Werthe haben können, $\frac{2}{3}$, $\frac{10}{9}$ und $\frac{15}{8}$. Hat das Intervall den größten dieser Werthe ($\frac{2}{3}$), so sagt man, die beiden Töne sind um einen großen ganzen Ton, hat es den nicht viel davon abweichenden Werth $\frac{10}{9}$, um einen kleinen ganzen Ton, und hat es endlich den kleinsten dieser Werthe ($\frac{15}{8}$), um einen halben Ton von einander verschieden.

§. 150. **Fortsetzung.** Wenn auch die Aufeinanderfolge der einzelnen Töne einer Octave auf unser Gehör eine angenehme Wirkung äußert, so ist dies doch nicht immer der Fall, wenn irgend 2 Töne der Octave von uns zu gleicher Zeit gehört werden, namentlich nicht, wenn die beiden Töne, der Grundton und die Secunde, oder der Grundton und die Septime, oder überhaupt 2 auf einander folgende Töne der Scale sind. Wohl aber wird unser Ohr befriedigt durch das Zusammentönen des Grundtones und der Terz, oder des Grundtons und der Quint, oder der Secunde und der Quint, oder der Terz und der Serte u. s. w. Man nennt deßhalb 2 Töne, welche, wenn sie zusammen gehört werden, eine angenehme Empfindung hervorrufen, consonirend (consonans, zusammentönend), solche dagegen, welche in diesem Falle eine unangenehme Empfindung erzeugen, dissonirend (dissonans, auseinander tönend).

Sucht man nun zu je 2 consonirenden Tönen das Verhältniß ihrer Schwingungszahlen, so findet man, daß dies immer durch die Zahlen 1, 2, 3, 4, 5 und 6 dargestellt werden kann; das Verhältniß der Schwingungszahlen dissonirender Töne dagegen kann nur in größeren Zahlen ausgedrückt werden. Wenn aber die Schwingungszahlen in so einfachen Verhältnissen stehen, wie bei den consonirenden Tönen, dann faßt das Gehör diese Verhältnisse auch am leichtesten auf, und wird dadurch beruhigt. Nächst dem Verhältniß 1 : 2 (des Grundtones zur Octave) ist das Verhältniß 2 : 3 das einfachste, d. i. das Verhältniß zwischen Grundton und Quint, weßhalb auch Grundton und Quint die angenehmste Consonanz bilden.

Eine Verbindung von mehr als zwei Tönen, welche zu gleicher Zeit gehört werden, heißt ein Accord, und zwar, wenn alle Tonverhältnisse, aus welchen er besteht, unter einander consoniren, ein consonirender Accord, im entgegengesetzten Fall ein dissonirender. Zu den consonirenden Accorden gehört vor Allem der Dreiklang, welcher aus Grundton, Terz und Quint (die Octave wird gewöhnlich noch zur Verstärkung beigegeben), oder C, E und G besteht. Die Verhältnisse dieser Töne sind nämlich 1 : $\frac{5}{4}$: $\frac{3}{2}$ oder in ganzen Zahlen 4 : 5 : 6, und es findet sich unter denselben (4 : 5, 4 : 6, 5 : 6) keines, das nicht eine Consonanz hervorbrächte.

Stellen wir die Tonverhältnisse zweier auf einander folgenden Octaven in Beziehung auf den Grundton C zusammen, so erhalten wir:

C	D	E	F	G	A	H	c	d	e	f	g	a	h	c.
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2	$\frac{9}{4}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{8}{3}$	3	$\frac{10}{3}$	$\frac{15}{4}$	4.

Nehmen wir nun hier A zum Grundton, so erhalten wir als Tonverhältnisse für die Secunde, Terz u. s. w. von A die Werthe $\frac{9}{8}$, $\frac{15}{8}$, 2, $\frac{9}{4}$, $\frac{5}{2}$, $\frac{8}{3}$, 3 und $\frac{10}{3}$, oder, $\frac{5}{3} = 1$ gesetzt, 1, $\frac{9}{8}$, $\frac{6}{5}$, $\frac{27}{20}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{3}$, $\frac{9}{5}$ und 2, also theilweise andere Werthe, wie für den Grundton C. Es zeigt sich, daß hier nicht nur Grundton und Secunde, sowie Grundton und Septime Dis-

Digitized by Google

sonanzen bilden, sondern auch Grundton und Quart, und Grundton und Sext. Ferner hat hier die Terz nur den Werth $\frac{5}{6}$, während ihr oben der Werth $\frac{4}{5}$ zukam, man nennt sie daher eine kleine Terz, und die andere die große Terz. Die große Terz ist demnach von der kleinen Terz um das Intervall $\frac{24}{25}$ verschieden. Da dieses Intervall noch kleiner ist als $\frac{15}{16}$, so nennt man es das Intervall eines kleinen halben Tones, und das zuletzt erwähnte das Intervall eines großen halben Tones. Dagegen ist das Verhältniß der Quint ganz ungeändert geblieben. Eine Tonleiter, in welcher die Verhältnisse der einzelnen Töne einer Octave zu dem Grundton durch die eben gefundenen Zahlen ausgedrückt werden, heißt eine Moll-Tonleiter (mollis, weich) im Gegensatz zu der früheren, welche dann Dur-Tonleiter (durus, hart) genannt wird. Diese Bezeichnungen sind daher genommen, weil die Moll-Tonleiter mehr dem Ausdrucke der Traurigkeit, die Dur-Tonleiter aber mehr dem Ausdrucke der Freude angemessen ist. Auch in der Moll-Tonart gehört der Dreiklang aus Grundton, Terz und Quint zu den consonirenden Accorden, denn das Verhältniß dieser 3 Töne ist $1 : \frac{5}{6} : \frac{2}{3}$ oder in ganzen Zahlen 10 : 12 : 15, und zusammengesetzt aus den Verhältnissen 10 : 12 oder 5 : 6, 10 : 15 oder 2 : 3, und 12 : 15 oder 4 : 5. Weil aber hier an die Stelle der großen Terz die kleine Terz getreten ist, so heißt dieser Dreiklang der kleine oder Moll-Dreiklang, und der frühere zum Unterschied davon der große oder Dur-Dreiklang.

§. 151. **Die chromatische Tonleiter.** Die im vorigen Paragraphen mitgetheilte Dur-Tonleiter war auf den Grundton C basirt, und wird deßhalb Cdur-Tonleiter genannt. Nun hindert aber Nichts, auch irgend einen der anderen Töne zum Grundton einer Dur-Tonleiter zu nehmen; nur müssen dann, wenn unser Ohr durch dieselbe befriedigt werden soll, die Intervalle zwischen den einzelnen, auf einanderfolgenden Tönen dieselben bleiben, wie wir sie oben gefunden haben, d. h. es müssen zuerst 2 ganze Töne, dann ein halber Ton, dann wieder 3 ganze Töne und zuletzt noch ein halber Ton auf einander folgen. Dieser Anforderung genügt aber dann die obige Tonleiter nicht mehr. Denn gesetzt, D solle zum Grundton genommen werden, so ist das Intervall zwischen D und E zwar ein ganzer Ton, aber das zwischen E und F nur ein halber Ton. Man muß demnach F noch um einen halben Ton erhöhen, um das Intervall eines ganzen Tones zu erhalten; statt des jetzt unbrauchbaren Tones F muß ein anderer, um einen halben Ton höherer eingeschaltet werden. Da zwischen F und G das Intervall ein ganzer Ton war, so ist das Intervall zwischen dem eingeschalteten Tone und G nur ein halber Ton, wie es auch nach der Dur-Tonleiter sein muß. Nun sollen wieder 3 ganze Töne auf einander folgen, G und A, A und H sind auch wirklich um einen ganzen Ton von einander verschieden, aber H und c nur um einen halben. Man kann demnach jetzt den Ton c auch nicht brauchen, sondern statt dessen muß abermals ein neuer Ton eingeschaltet werden, der wieder um einen halben Ton höher ist, als c. Dadurch wird dann auch zugleich das Intervall zwischen dem eingeschalteten Tone und der Octav d zu einem halben Tone. Wir wollen nun auch noch den Fall setzen, daß F zu dem Grundtone genommen werden solle. Zwischen F und G, G und A beträgt das Intervall einen ganzen Ton. Nun folgt aber statt eines halben Tones ein ganzer Ton (zwischen A und H)

Digitized by Google

und dann wieder ſtatt eines ganzen nur ein halber (zwiſchen H und c). Beiden Uebelſtänden wird offenbar dadurch abgeholfen, daß H um einen halben Ton erniedrigt wird, d. h. daß ſtatt H ein anderer Ton eingeſchaltet wird, der um einen halben Ton niedriger iſt. So würde man finden, daß, je nachdem der eine oder der andere Ton zum Grundton genommen wird, bald der eine, bald der andere Ton, bald mehrere zugleich entweder um einen halben Ton erhöht oder erniedrigt werden müſſen. Man muß alſo, ſtreng genommen, zwiſchen je zwei Tönen ſowohl eine Erhöhung des tieferen, als auch eine Erniedrigung des höheren einſchalten. Die Schwingungszahlen, und ſomit auch die Höhe der neuen Töne werden zwar verſchieden ſein, aber ziemlich nahe unter einander, oder, wenn die beiden urſprünglichen Töne nur um einen halben Ton verſchieden waren, mit derjenigen des einen der urſprünglichen Töne zuſammenfallen, ſo daß ſie nicht mehr ſcharf von unſerem Ohre als geſonderte Töne geſchieden werden. Man begnügt ſich daher damit, zwiſchen je 2 Tönen, deren Intervall einen ganzen Ton beträgt, noch einen halben Ton einzuſchalten, der dann ſowohl als die Erhöhung des tieferen, als auch als die Erniedrigung des höheren angeſehen werden darf. Von dem Grundtone bis zu ſeiner Octave haben wir nun nicht mehr 7 verſchiedene Töne, ſondern 12. Die eingeſchalteten Töne werden, wenn ſie als Erhöhungen des tieferen Tones angeſehen werden müſſen, durch Anhängung der Sylbe is an den Namen des tieferen Tones bezeichnet, dagegen durch Anhängung der Sylbe es an den Namen des höheren Tones, wenn ſie als Erniedrigung des höheren Tones betrachtet werden. So heißt der zwiſchen C und D eingeſchaltete Ton bald Cis, bald Des, je nachdem er eine Erhöhung von C oder eine Erniedrigung von D iſt. Statt Ees, Aes und Hes ſagt man aber Es, As und B.

Die hier näher beſchriebene Tonleiter heißt die *chromatiſche Tonleiter* (χρωματικός, gefärbt, weil die Griechen die eingeſchalteten Töne noch nicht durch die Zeichen # und b unterſchieden, ſondern dadurch, daß ſie dieſelben durch rothe Farbe kenntlich machten). Wird auch noch der Unterſchied zwiſchen Cis und Des u. ſ. w. feſtgehalten, und werden dieſe Töne als verſchiedene Töne behandelt, was aber bei der gewöhnlichen Einrichtung unſerer muſikaliſchen Inſtrumente nur durch die Streichinſtrumente und die menſchliche Stimme möglich iſt, ſo nennt man eine ſolche, die Tonverhältniſſe am genaueſten und vollkommenſten wiedergebende, und dadurch eine reine Harmonie möglich machende Tonleiter eine *enharmoniſche* (ἐναρμονικός, harmoniſch).

§. 152. **Temperatur, gleichſchwebende und ungleichſchwebende.** Da die Intervalle zweier ganzen oder zweier halben Töne nicht immer gleich ſind, und eben ſo wenig, wie wir eben geſehen haben, die Erhöhung eines Tones mit der Erniedrigung des nächſt folgenden genau zuſammenfällt, ſo iſt es unmöglich, in den gewöhnlichen Tonleitern alle Tonverhältniſſe rein wiederzugeben. So iſt z. B. in der C dur-Tonleiter die Schwingungszahl von D auf den Grundton bezogen $\frac{9}{8}$, die ſeiner Quinte A $\frac{3}{2}$; dies gibt für das Intervall dieſer Quinte $\frac{4}{27}$, und iſt demnach um $\frac{1}{81}$ von dem reinen Quintenverhältniß $\frac{3}{2}$ verſchieden. Wollte man dagegen die Schwingungszahl von A ſo umändern, daß ſie $\frac{3}{2}$ mal größer würde, als diejenige von D, ſo würde dadurch das reine Verhältniß zu dem Grundton geändert werden müſſen. Wenn man daher bei Fortſchreitungen in großen oder

Digitized by Google

kleinen Terzen, Quarten oder Quinten die Verhältnisse $\frac{5}{4}$, $\frac{4}{3}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{3}$ streng festhält, so werden die Verhältnisse zu dem Grundton dadurch alterirt, und man kommt dadurch zu Octavtönen, deren Schwingungszahl dann nicht mehr genau das Doppelte ihrer Grundtöne sein würde (z. B. bei der Fortschreitung von C zu G zu d zu a würde a die Schwingungszahl $\frac{3}{2} \times \frac{3}{2} \times \frac{3}{2} = \frac{27}{8}$ erhalten, als Octave von A kommt ihm aber die Schwingungszahl $2 \times \frac{5}{3}$ oder $\frac{10}{3}$ zu). Diese Störung des einfachsten aller Tonverhältnisse (1 : 2) würde von dem Ohre nur unangenehm empfunden werden. Man war daher bemüht, vor allen Dingen das Octavenverhältniß rein zu erhalten, und die übrigen Intervalle soviel als möglich mit den oben aufgestellten Verhältnissen in Uebereinstimmung zu bringen. Die dadurch nothwendig werdende Abänderung der Intervalle nennt man die Temperatur. Werden die Fehler gleichförmig auf alle Töne einer Octave vertheilt, so heißt die Temperatur gleichschwebend, sonst ungleichschwebend. Der Grund dieser Benennungen wird aus §. 162 erhellen. Bei der gleichschwebenden Temperatur werden die Abweichungen in den einzelnen Fällen grade wegen der gleichen Vertheilung nur gering, und deßwegen von einem selbst geübten Ohre kaum wahrgenommen. Aus diesem Grunde hat auch diese Temperatur vor der ungleichschwebenden den Vorzug erhalten, wiewohl viele Versuche ungleichschwebender Temperaturen durch verschiedene Arten, die nothwendigen Abweichungen auf die verschiedenen Töne zu vertheilen, gemacht worden sind.

Es soll nun noch gezeigt werden, wie man in der chromatischen Tonleiter bei der gleichschwebenden Temperatur verfahren müsse, um die Verhältnisse der Schwingungszahlen der einzelnen Töne zu dem Grundtone zu finden. Nach 12 Quinten kommt man in dieser Tonleiter zu der siebenten Octave des Tones, von welchem man ausgegangen ist. Dieser Ton soll aber rein erhalten werden, folglich muß ihm der Werth 2^7 zukommen; als zwölfte Quinte hätte er den Werth $(\frac{3}{2})^{12}$. Das Quintenverhältniß $\frac{3}{2}$ kann aber, da $(\frac{3}{2})^{12} = 2^7$ ist, nicht beibehalten werden, sondern es muß statt dessen ein neues gesucht werden. Dies geschieht durch die Gleichung $x^{12} = 2^7$, also $12 \times \log. x = 7 \times \log. 2$, wodurch $x = 1{,}4983\ldots$ erhalten wird, welcher Werth demnach in der gleichschwebenden Temperatur als Quintenverhältniß statt 1,5 gesetzt werden muß. Die 12 Quinten fallen aber auch nach und nach auf die 12 verschiedenen Töne der Octave und es lassen sich demnach durch den gefundenen Werth die Werthe aller einzelnen Töne bestimmen.

Viertes Kapitel.

Von der Fortpflanzung des Schalles.

§. 153. **Die Fortpflanzung des Schalles wird durch Körper vermittelt.** Wenn man ein Schlagwerk auf einer weichen Unterlage, z. B. auf einem mit Heu ausgestopften Kissen, auf den Teller einer Luftpumpe setzt, und stellt eine Glasglocke darüber, so bemerkt man sogleich eine bedeutende Schwächung des Schalles. Wird dann die Luft ausgepumpt, so wird der Schall immer weniger hörbar, und wenn die Verdünnung der Luft einen gewissen Grad erreicht hat, so verschwindet der Schall gänzlich.

Digitized by Google

Hat man aber das Schlagwerk unmittelbar auf den Teller der Luftpumpe aufgesetzt, so gelingt es nicht, den Schall zum gänzlichen Verschwinden zu bringen.

Wir ersehen hieraus, daß die Fortpflanzung des Schalls ein größeres Hinderniß findet, wenn sich zwischen dem schallenden Körper und unserem Ohre verschiedene Körper, in unserem Versuche Luft, Glas und wieder Luft, befinden, als wenn diese Verbindung nur durch einen und denselben Körper hergestellt ist. Daraus aber, daß der Schall beim Auspumpen der Luft nach und nach ganz verschwindet, schließen wir, theils daß die Luft den Schall desto schlechter fortpflanzt, je dünner sie ist, theils aber auch, daß gar keine Fortpflanzung möglich ist, wenn sich der schallende Körper in einem leeren Raum befindet. Aus dem Umstande aber, daß der Versuch nur dann gelingt, wenn das Schlagwerk auf einer weichen Unterlage steht, nicht aber, wenn es unmittelbar auf den Teller der Luftpumpe gesetzt wird, geht hervor, daß auch ohne Mitwirkung der Luft noch eine Fortpflanzung des Schalles möglich ist, in unserem Versuche offenbar durch die festen Theile der Luftpumpe. Da aber, sobald zwischen den Theilen der Luftpumpe und dem schallenden Körper ein weicher Körper eingeschoben wird, auch diese Art der Fortpflanzung aufgehoben wird, und da wir wissen, daß die Theilchen weicher Körper nicht geeignet sind, eine schwingende Bewegung anzunehmen, so sind wir zu dem Schlusse berechtigt, die Fortpflanzung des Schalles geschehe auf die Weise, daß der schallende Körper auch die ihn umgebenden Körper in Schwingungen versetzt, und daß wir nur dann einen Schall wahrnehmen, wenn die dadurch erzeugten Schwingungen sich bis zu unserem Ohre fortpflanzen.

§. 154. **Fortpflanzung durch die Luft.** In den allermeisten Fällen befindet sich zwischen einem schallenden Körper und unserem Ohre die atmosphärische Luft. Sie ist daher auch für uns das vorzüglichste Fortpflanzungsmittel des Schalles, und dazu auch ganz besonders geeignet wegen ihres hohen Grades von Elasticität, welche sie fähig macht, durch einen mit ihr in Berührung seienden, schwingenden Körper selbst in Schwingungen zu gerathen. Den Vorgang müssen wir uns ganz ähnlich denken, wie er in §. 143 geschildert ist. Nur ist jetzt die Luft nicht in eine Röhre eingeschlossen, sondern umgibt den schallenden Körper von allen Seiten. Aus der Erfahrung aber, daß der Schall von dem schallenden Körper nach allen Richtungen hin vernommen wird, lernen wir, daß die Luft auch nach allen Richtungen hin durch die Schwingungen des schallenden Körpers in fortschreitende Schwingungen versetzt wird. Daher nennen wir jede grade Linie, welche von dem Orte der Schallbewegung ausgeht, einen Schallstrahl, und nehmen an, daß längs eines solchen Verdichtungen der Luft mit Verdünnungen abwechseln. Da die bewegende Kraft (die Schwingungen des schallenden Körpers) und der bewegte Körper (die den schallenden Körper umgebende Luft) dieselben bleiben, so müssen sich auch diese Schwingungen in gleicher Zeit nach allen Richtungen hin gleichweit fortpflanzen, und die durch dieselben erzeugten fortschreitenden Wellen müssen demnach um den Ort der Schallerregung herum Kugelhüllen bilden, während die Wasserwellen sich in concentrischen Kreisen in derselben Ebene ausbreiten. Da sich in der Luft wegen der leichten Verschiebbarkeit ihrer Theilchen jeder in irgend einer Richtung auf sie ausgeübte Druck mit gleicher Stärke nach allen Richtungen hin fortpflanzt, so könnte die Frage entstehen, warum wir dessen-

Digitized by Google

ungeachtet annehmen, daß die Zusammendrückung, welche die den schallenden Körper umgebenden Lufttheilchen durch die Schwingungen desselben erfahren, sich immer nur in grader Richtung von dem schallenden Körper weg, und nicht zugleich auch seitlich weiter verbreite. Allerdings drückt jedes Lufttheilchen nicht blos nach Vornen, sondern ebenso stark auch nach beiden Seiten, aber es wird von den neben ihm liegenden Lufttheilchen zu gleicher Zeit auch mit gleicher Stärke nach entgegengesetzter Richtung gedrückt, wodurch Druck und Gegendruck sich natürlich einander aufheben.

Es braucht wohl nicht erst noch erwähnt zu werden, daß von dem schallenden Körper bei jeder neuen Schwingung desselben auch neue fortschreitende Schallwellen ausgehen, so daß so viele Schallwellen an unser Ohr treffen, als der schallende Körper Schwingungen macht.

§. 155. **Fortpflanzung durch andere Körper.** 1) Die unter dem Wasser lebenden Thiere, wie Fische, Krebse u. s. w. haben Gehörwerkzeuge. 2) Schlägt man eine Glocke unter Wasser an, so hören die unter dem Wasser befindlichen Personen einen kurzen, klanglosen Ton. 3) Abgerichtete Fische können durch den Ton einer Glocke oder Pfeife herbeigelockt werden. 4) Wenn man an dem einen Ende eines langen Balkens ein kleines Geräusch erregt, indem man z. B. mit einer Nadel an dem Holze kratzt, so nimmt man dasselbe sehr deutlich wahr, wenn man das Ohr auf das andere Ende des Balkens hält, selbst wenn man das Geräusch in dieser Entfernung durch die Luft nicht mehr hören könnte. 5) Bindet man an das eine Ende eines Fadens einen silbernen Löffel, und hält das andere Ende zwischen den Zähnen, verstopft sich die Ohren, und schlägt den silbernen Löffel an, so wird man den sonst schwachen Klang desselben wie einen starken Klang einer Glocke hören. 6) Durch einen Stab aus irgend einem festen Körper hört man, wenn das eine Ende an die Zähne, vorzüglich an die oberen, und das andere an einen schallenden Körper angestemmt wird, bei verstopften Ohren den Schall eben so stark, oder selbst noch stärker, als durch die Luft.

Alle diese angeführten Erfahrungen zeigen, daß es nicht die ausdehnsam flüssigen Körper, wie die atmosphärische Luft, allein sind, welche die Fähigkeit besitzen, den Schall fortzupflanzen, sondern daß diese Fähigkeit auch den Körpern der übrigen Aggregatzustände, sowohl den tropfbar flüssigen, als den festen, zukomme. Auffallend ist jedenfalls diese Fähigkeit an tropfbar flüssigen Körpern, da sie, wie früher gezeigt worden ist, nur bei Anwendung einer sehr großen Kraft sich als zusammendrückbar und elastisch erweisen, also wenig geeignet sind, durch die Schwingungen eines schallenden Körpers selbst eine schwingende Bewegung anzunehmen. Aus der unter 2 angeführten Erfahrung, daß der unter Wasser erzeugte Ton einer Glocke in diesem Mittel nur als ein klangloser Ton von kurzer Dauer vernommen wird, scheint auch hervorzugehen, daß die Art, wie der Schall durch das Wasser verbreitet wird, nicht wohl als Schwingungen der einzelnen Wassertheilchen anzusehen ist, sondern vielmehr als eine dem Wasser von dem schallenden Körper mitgetheilte Stoßbewegung, die sich dann bei der großen Beweglichkeit und Verschiebbarkeit der Theilchen in der Richtung des Stoßes immer weiter fortpflanzt. Die festen Körper sind im Allgemeinen wegen ihrer größeren Elasticität, und wegen der daraus hervorgehenden größeren Leichtigkeit, in Schwingungen zu gerathen, wieder

Digitized by Google

viel geeigneter, den Schall weiter zu verbreiten; aber doch vermögen dies nicht alle in gleichem Grade, sondern um desto besser, je härter und elastischer sie sind. Von den weichen Körpern ist schon §. 153 gezeigt worden, daß ihnen die Fähigkeit, den Schall fortzupflanzen abgeht.

Von der oft viel stärkeren Fortpflanzung des Schalles durch feste Körper, als durch Luft, hat man eine nützliche Anwendung in dem Stethoscop (στῆθος, Brust und σκοπεῖν, spähen) gemacht. Es ist dies ein ungefähr 1 Fuß langer und ½ Zoll dicker Cylinder aus hartem Holze, welcher am einen Ende flach und der Länge nach durchbohrt ist, und dient dem Arzte, um ihm bei Lungenleiden die Anwesenheit innerer Höhlungen kund zu machen. Das eine Ende wird auf den kranken Theil des Körpers gehalten, am anderen Ende horcht der Arzt, ob der Schall die bei dem Vorhandensein solcher Höhlungen eigenthümliche Beschaffenheit habe.

§. 156. **Geschwindigkeit des Schalles.** Wenn in einiger Entfernung von uns ein Gewehr oder ein Geschütz abgefeuert wird, so sehen wir stets zuerst den Blitz, und hören erst nach einiger Zeit den Knall.

Fragen wir nach der Ursache dieser Erscheinung, da ja Blitz und Knall in demselben Momente entstehen, so ist keine andere denkbar, als daß das Licht des Blitzes und der Schall des Knalles eine verschiedene Zeit gebraucht haben, um den Weg bis zu uns zurückzulegen. Nun weiß man (§. 176), daß das Licht in jeder Secunde einen Weg von 42100 deutschen Meilen zurücklegt. Da alle Entfernungen, in welchen wir solche Beobachtungen, wie die angeführten, anstellen können, gegen 42100 deutsche Meilen verschwindend klein sind, so dürfen wir annehmen, daß wir in allen solchen Beobachtungen den Blitz in demselben Momente sehen, in welchem er auch erzeugt wird. Die Zeit also, um welche der Knall später gehört wird, ist die Zeit, welche er gebraucht hat, um von dem Orte seiner Entstehung bis zu uns zu gelangen. Wird dann diese Zeit sowohl, als auch die Entfernung der beiden Orte von einander genau gemessen, und mit der Anzahl Secunden in die Entfernung dividirt, so zeigt der Quotient, welchen Weg der Schall in einer Secunde zurücklegt, d. h. die Geschwindigkeit des Schalles. Solche Beobachtungen sind denn zu verschiedenen Malen mit großer Genauigkeit angestellt worden. Vor Allem mußte darauf gesehen werden, den Einfluß des Windes zu beseitigen, da er offenbar je nach der Richtung seines Wehens die Geschwindigkeit bald vergrößert, bald verkleinert. Es geschieht dies dadurch, daß man auf beiden Stationen zu gleicher Zeit Kanonen abfeuert, und auf beiden die Zeit genau beobachtet, welche vergeht, bis der Schall ankommt. Das aus den 2 Beobachtungen gezogene arithmetische Mittel wird dann die Geschwindigkeit geben, wie sie ohne die Einwirkung des Windes sein müßte, weil der Wind, wenn er die Geschwindigkeit nach der einen Richtung um eine gewisse Größe vermehrt hat, sie nach der entgegengesetzten Richtung genau um dieselbe Größe vermindert haben muß. Als Resultat der angestellten Beobachtungen hat sich ergeben, daß die Geschwindigkeit des Schalles in der atmosphärischen Luft 1058 rheinl. Fuß beträgt. Man sollte denken, daß auch die größere oder geringere Dichtigkeit der Luft zu verschiedenen Zeiten einen Einfluß auf die Geschwindigkeit des Schalles ausüben müßte, da jede Bewegung in einem dichteren Mittel ein größeres Hinderniß findet, als in einem dünneren. Allein bei der Luft wächst mit der Dichte derselben in demselben

Digitized by Google

Verhältniß auch ihre Expanſivkraft oder ihre Elaſticität, welche dann, weil ſie die ſchwingende Bewegung der Lufttheilchen erleichtert, die Geſchwindigkeit des Schalles in demſelben Verhältniß vermehrt, in welchem ſie durch die größere Dichtigkeit vermindert wird. Nur wenn das Verhältniß der Expanſivkraft zur Dichte der Luft (dieſes Verhältniß nennt man die ſpecifiſche Elaſticität der Luft) verändert wird, ändert ſich daher auch die Geſchwindigkeit des Schalles. Das angegebene Verhältniß ändert ſich aber durch die Wärme, und iſt deſto größer, je höher die Temperatur, weßhalb auch der Schall in wärmerer Luft ſich ſchneller fortpflanzt. Nach den Beobachtungen wächſt ſeine Fortpflanzungsgeſchwindigkeit mit jedem Grade Celſius ungefähr um 2 rheinl. Fuß. Da nun bei uns die mittlere Jahrestemperatur ungefähr 10° C. iſt, ſo werden wir die Zahl 1058, welche die Geſchwindigkeit bei 0° C. iſt, noch um 20 Fuß vermehren müſſen, was dann 1078 oder in runder Zahl 1080 Fuß gibt. Die Kenntniß der Schallgeſchwindigkeit gibt uns auch ein Mittel an die Hand, über die Entfernung eines Ortes von uns, an welchem Licht und Schall zugleich entſteht, z. B. über die Entfernung eines herannahenden Gewitters, ein Urtheil zu fällen.

Durch die Vergleichung der Reſultate der verſchiedenen angeſtellten Beobachtungen ergibt ſich auch, daß ſtets in demſelben Verhältniß, in welchem die Entfernung der beiden Beobachtungsſtationen größer wird, auch die Zeit größer wird, nach welcher der Schall wahrgenommen wird. Daraus geht aber hervor, daß die Bewegung des Schalles eine gleichförmige ſein muß, d. h. eine ſolche, bei welcher in gleichen Zeiten ſtets gleiche Wege zurückgelegt werden. Aus der Erfahrung ferner, daß die Harmonie einer Muſik nicht geſtört wird, wir mögen dieſelbe aus einer größeren oder geringeren Entfernung anhören, ſehen wir, daß ſich hohe und tiefe Töne nothwendig mit derſelben Geſchwindigkeit fortpflanzen müſſen, da anderen Falls die zuſammengehörigen und von den Muſikern gleichzeitig erzeugten Töne nicht auch gleichzeitig zu unſerem Ohre gelangen könnten, ſondern die trefflichſte Harmonie ſchon in geringer Entfernung in die ſchrecklichſte Disharmonie ausarten müßte.

Da bei jedem Hin- und Hergang des ſchallenden Körpers eine Schallwelle entſteht, die ſich dann in den Richtungen der Schallſtrahlen nach und nach fortpflanzt, ſo werden ſich nach Verlauf von einer Secunde ſo viele Schallwellen gebildet haben, als der ſchallende Körper Schwingungen gemacht hat, die zuerſt gebildete wird ſich aber um 1080 Fuß von dem ſchallenden Körper entfernt haben. Um demnach in einem beſtimmten Falle die Länge einer Schallwelle zu finden, braucht man nur 1080 Fuß durch die Schwingungszahl des ſchallenden Körpers zu dividiren. Der Quotient wird offenbar deſto kleiner, je größer dieſe Schwingungszahl, d. h. je höher der Ton iſt. Die Länge der Schallwellen iſt demnach für verſchiedene Töne nicht gleich, ſondern am größten für die tiefſten Töne, und nimmt mit der Tonhöhe ab. Der tiefſte in der Muſik gebräuchliche Ton iſt der einer offenen Orgelpfeife von 32 Pariſer Fuß Länge, und der höchſte derjenige einer offenen Pfeife von $\frac{1}{8}$ Pariſer Fuß Länge. Da nun nach §. 147 die Länge der Pfeife $= \frac{1}{2}$ Wellenlänge des zugehörigen Tones iſt, ſo wäre demnach die Wellenlänge des tiefſten Tones 64, und diejenige des höchſten Tones $\frac{1}{4}$ Par. Fuß.

Digitized by Google

Die 32 füßige Orgelpfeife macht bei 0°C fast genau 16 Schwingungen in der Secunde. Während einer halben Schwingung sind aber, wie oben gezeigt wurde, schon alle Theilchen der ganzen Luftsäule in Bewegung gerathen, was sich also während 16 Schwingungen oder in einer Secunde 32 mal wiederholt, folglich ist die Geschwindigkeit der stehenden Welle in der Pfeife = 32 × 32 Par. Fuß, oder, da 32 Par. Fuß fast genau = 33 rheinl. Fuß sind, = 33 × 32 oder 1056 rheinl. Fuß, also dieselbe, welche oben als Geschwindigkeit der fortschreitenden Schallwellen angegeben wurde. Dasselbe Resultat muß man auch durch jede andere Pfeife erhalten, da in demselben Verhältniß, in welchem die Pfeife kürzer wird, die Schwingungszahl derselben größer wird, der Weg also so vielmal mehr zurückgelegt wird, als er kürzer geworden ist. Es haben demnach in jeder tönenden Pfeife die den Schall erzeugenden stehenden Wellen genau dieselbe Geschwindigkeit, wie die fortschreitenden Wellen, durch welche der Schall fortgepflanzt wird.

§. 157. **Fortsetzung.** Auch über die Geschwindigkeit des Schalles in anderen Körpern sind einige Versuche angestellt worden, die im Allgemeinen das Resultat gaben, daß sie größer sei, als in der atmosphärischen Luft. So haben wir über die Geschwindigkeit im Wasser Versuche von Colladon und Sturm. Sie senkten auf dem Genfer See eine Glocke unter Wasser. Der Stiel des Hammers, durch welchen die Glocke angeschlagen wurde, befand sich über dem Wasser, und an demselben war eine brennende Lunte befestigt, welche in dem Augenblick, in welchem der Hammer auf die Glocke schlug, eine Pulvermasse entzündete. Um den in dem Wasser erregten, und durch das Wasser fortgepflanzten Schall auch außerhalb desselben wahrnehmen zu können, bedienten sie sich einer nach Unten sich erweiternden Röhre, welche an ihrem unteren Ende mit einer dünnen Blechplatte geschlossen war. Diese Blechplatte fing den Schall unter Wasser auf und theilte ihn der Luft in der Röhre mit, von welcher ihn das an die obere enge Oeffnung gehaltene Ohr empfing. Sie fanden auf diese Weise die Geschwindigkeit des Schalles im Wasser 4,3 mal größer, als in der Luft.

Ueber die Geschwindigkeit in festen Körpern sind directe Versuche nur von Biot und zwar in Beziehung auf das Eisen angestellt worden. An jedem Ende einer 3030 rheinl. Fuß langen, zu einer Wasserleitung bestimmten, eisernen Röhre stand ein Beobachter, und schlug in vorher genau bestimmten Augenblicken auf die Röhre. Am anderen Ende wurde ein zweifacher Schall gehört, von welchen der eine durch das Eisen, und der andere durch die Luft fortgepflanzt wurde. Durch die Vergleichung des zurückgelegten Weges mit der darauf verwandten Zeit ergab sich die Geschwindigkeit im Eisen ungefähr 10 mal größer, als in der Luft.

Auf indirectem Wege hat Chladni die Geschwindigkeit des Schalles in einer ganzen Reihe von festen Körpern bestimmt. Von dem am Ende des vorigen Paragraphen für die Luft aus der Erfahrung gefundenen Gesetze ausgehend, daß die stehenden und fortschreitenden Wellen eine gleiche Geschwindigkeit haben, überträgt er dasselbe auch auf die festen Körper, da diese auch sonst sich in Ansehung ihrer Longitudinalschwingungen ganz nach denselben Gesetzen richten, wie die Luft. Wenn dem-

Digitized by Google

nach ein in Longitudinalschwingungen versetzter Stab aus irgend einem festen Körper denselben Ton geben würde, wie eine gleich lange Luftsäule in einer offenen Pfeife, so müßte auch die Geschwindigkeit des Schalles in dem festen Körper und in der Luft gleich groß sein. In der Regel sind aber die Töne der Stäbe höher, sie machen also in derselben Zeit mehr Schwingungen, und deßhalb legt auch der Schall in ihnen in derselben Zeit einen größeren Weg zurück, und natürlich einen so vielmal größeren Weg, als die Schwingungszahl des Tones, welchen der Stab gibt, größer ist, als die Schwingungszahl des durch die Luftsäule von gleicher Länge erzeugten Tones. Indem er so die durch Longitudinalschwingungen hervorgebrachten Töne von Stäben aus verschiedenen festen Körpern mit den Tönen einer gleich langen Luftsäule in einer offenen Pfeife verglich, fand er die Geschwindigkeit des Schalles in Zinn $7\frac{1}{4}$, in Silber 9, in Kupfer 12, in Eisen und Glas ungefähr 17, in verschiedenen Hölzern ungefähr zwischen 11 und 17, und in gebranntem Tone 10 bis 12 mal größer, als in der Luft. Auffallend ist, daß Biot und Chladni zu so verschiedenen Werthen für die Geschwindigkeit des Schalles in Eisen gekommen sind, doch dürfte sich dieser Unterschied hinlänglich dadurch erklären, daß die eiserne Röhre, an der Biot seine Versuche machte, wegen ihrer Länge aus verschiedenen Stücken zusammengesetzt sein mußte, die durch ein anderes Metall mit einander verbunden waren. Wertheim hat außerdem gezeigt, daß die von Chladni gefundenen Zahlen nur für stabförmige Körper gelten, und daß die Geschwindigkeit, wenn sich der Schall nach allen Seiten ausbreiten kann, sogar noch größer werde im Verhältniß von $\sqrt{2} : \sqrt{3}$.

§. 158. **Stärke des Schalles.** 1) Je weiter man sich von einem schallenden Körper entfernt, desto schwächer wird der Schall gehört. 2) Wenn man eine gespannte Saite in Schwingungen versetzt, so ist der erzeugte Ton Anfangs am stärksten, nimmt aber immer mehr an Stärke ab, bis er endlich, ohne daß sich im ganzen Verlauf seine Höhe geändert hätte, gänzlich verschwindet. 3) Wenn man sich auf eine größere Entfernung verständlich machen will, so ruft man mit erhöhter Stimme.

Vor allen Dingen muß hier bemerkt werden, daß es sehr schwer ist, genaue Bestimmungen über die Stärke des Schalles aufzustellen, da wir bis jetzt kein Mittel kennen, dieselbe numerisch messen zu können, sondern einzig und allein auf die Empfindungen unseres Gehörsinnes, also auf eine subjective Beurtheilung, beschränkt sind. Was nun die erste der mitgetheilten Erfahrungen betrifft, so ist schon erwähnt, daß die Luft um den schallenden Körper kugelförmige Wellen bildet, die natürlich um so größer werden, je weiter sie sich ausbreiten. Die durch die Schwingungen des schallenden Körpers hervorgebrachte Bewegung muß also immer mehr Lufttheilchen mitgetheilt werden, und muß sich demnach für die einzelnen bewegten Theilchen in demselben Verhältniß vermindern, in welchem die bewegten Theilchen mehr werden. Nun verhalten sich aber Kugelflächen wie die Quadrate ihrer zugehörigen Radien, und die Radien messen die Entfernungen von dem schallenden Körper, daher das Gesetz: die Stärke des Schalles nimmt ab, wie die Quadrate der Entfernungen von dem schallenden Körper zunehmen. Dieses Gesetz kann offenbar nicht mehr gültig sein, sobald die Ausbreitung der Schallwellen

Digitized by Google

nach allen Richtungen hin verhindert wird, indem dann der angeführte Grund der Schwächung wegfällt. Deßwegen pflanzt sich auch der Schall durch eine cylindrische Luftsäule auf eine weit größere Entfernung ohne bedeutende Abnahme seiner Stärke fort. Man hat hiervon eine Anwendung in dem Communicationsrohre gemacht (auf Schiffen zwischen dem Mastkorb und der Cajüte des Capitäns, in Fabriken zwischen den einzelnen Arbeitssälen und dem Zimmer des Fabrikherrn). Auf demselben Grunde beruht es wohl auch, daß sich der Schall in stabförmigen festen Körpern ebenfalls auf große Entfernungen mit fast ungeschwächter Intenstät verbreitet.

Von einer gespannten Saite haben wir früher gesehen, daß ihre Excursionen Anfangs am größten sind, dann aber allmählig immer mehr abnehmen, bis sie endlich gleich Null werden, und die Saite zur Ruhe kommt. Da nun mit der Abnahme der Excursionen auch die Stärke des erzeugten Schalles abnimmt, so lernen wir daraus, daß die Stärke des Schalles bedingt sei durch die Größe der Excursionen. Es war dies auch um so mehr zu erwarten, als offenbar der schallende Körper um so stärker bewegend auf das ihn umgebende Mittel einwirken muß, je größer seine eigene Bewegung, d. h. je weiter seine Excursionen sind.

Wenn ferner hohe Töne unter sonst gleichen Umständen auf eine größere Entfernung gehört werden, als tiefe, sich also auch mit größerer Stärke fortpflanzen, so kann der Grund davon kein anderer sein, als daß sie, da sie in derselben Zeit mehr Schwingungen machen, als die tiefen Töne, auch auf das umgebende Mittel in derselben Zeit öfter bewegend einwirken, wodurch wieder die dem Mittel mitgetheilte Bewegung vergrößert wird.

In dem Versuche von §. 153 war gezeigt, daß der Schall auch desto schwächer wird, je dünner die Luft ist, welche ihn fortpflanzen soll. Dasselbe lehren noch viele andere Erfahrungen; so z. B. ist der Knall einer abgeschossenen Pistole auf Bergen nicht so stark, als in der Ebene, an kalten Tagen, also an solchen, an welchen die Luft eine größere Dichtigkeit besitzt, hört man einen Schall weiter, als an warmen u. s. w. Die Ursache dieser Erscheinung kann keine andere sein, als die, daß die Luft, je größer ihre Dichte ist, desto weniger den Stößen des schallenden Körpers ausweicht, wodurch dann Verdichtung sowohl, wie Verdünnung in der Schallwelle größer werden müssen. Hierher gehört auch die Erfahrung, daß sich der Schall besser von Unten nach Oben, als umgekehrt, fortpflanzt, da oben, also in der dünneren Luft, der erregte Schall schon an und für sich eine geringere Intenstät besitzt. In dem angeführten Versuche haben wir noch ferner gesehen, daß sich der Schall, wenn er sich durch verschiedene Mittel von verschiedener Dichte bis zu unserem Ohre fortpflanzen muß, ebenfalls eine bedeutende Schwächung erleidet. Auch hiefür sprechen noch viele andere Erscheinungen. So wird z. B. der Schall durch zwei Bretter, welche eine Luftschicht zwischen sich enthalten, viel mehr geschwächt, als durch ein einziges, doppelt so dickes Brett. Der Schall der Trommeln wird dadurch gedämpft, daß man sie mit wollenen Tüchern überzieht, weil sich zwischen den materiellen Theilchen des Tuches noch viele mit Luft gefüllte Zwischenräume befinden u. s. w. Eine Ursache hiervon ist wohl darin zu suchen, daß, wie so eben gezeigt wurde, bei jeder Abnahme der Dichte des Fort-

Digitized by Google

pflanzungsmittels eine Schwächung eintritt; eine weitere Ursache dürfte auch wohl noch die sein, daß an der Trennungsfläche zweier Mittel nie die schwingende Bewegung sich ganz in das zweite Mittel fortpflanzt, sondern theilweise auch in das erste Mittel zurückgeht. Auf dieser Schwächung beim Durchgang durch Mittel von verschiedener Dichte beruht wohl auch die vorzüglichste Ursache, warum ein Schall bei Nacht viel besser gehört wird, als am Tage. Die ungleiche Erwärmung der Luft am Tage bringt in derselben Schichten von verschiedener Dichte hervor, während die Luft in der Nacht wegen der gleichmäßigeren Temperatur auch eine gleichmäßigere Dichte zeigt. Dazu kommt freilich noch, daß in der Nacht wegen der in der Regel geringeren Temperatur die Luft auch dichter ist, als am Tage, daß die Stille der Nacht unser Ohr empfindlicher macht, da unsere Sinne, je mehr Eindrücke gleichzeitig auf sie eindringen, desto abgestumpfter für einen einzelnen Eindruck sind, und daß der Gesichtssinn in der Nacht ruht, wodurch, wie die Erfahrung bei Blinden zeigt, eine erhöhte Thätigkeit des Gehörsinnes hervorgerufen wird.

Daß die Stärke des Schalles auch die Entfernung bedingt, bis auf welche er vernommen wird, ist klar, ja es könnten diese Entfernungen recht gut ein Maß für dieselbe abgeben, wenngleich bei solchen Messungen noch gar vielerlei andere Umstände Berücksichtigung finden müßten. Die größten Entfernungen, bis zu welchen ein Schall sich fortgepflanzt hat, sollen bis jetzt in folgenden beiden Fällen beobachtet worden sein. Die Explosionen des Vulcans auf der kleinen Antille St. Vincent sollen bis Demerary in dem englischen Guiana, also in einer Entfernung von 75 geogr. Meilen, und die Canonade von Antwerpen im Jahre 1832 im sächsischen Erzgebirge in einer Entfernung von sogar 80 geogr. Meilen gehört worden sein.

§. 159. **Reflexion des Schalles.** 1) Ein Sprechender wird unter sonst gleichen Umständen in einem Zimmer leichter verstanden, als im Freien. 2) Ist der geschlossene Raum größer, so hört man wohl nach jedem Schalle ein kurze Zeit anhaltendes Nachklingen desselben (Nachhall). 3) An manchen Stellen wird jeder daselbst hervorgebrachte Schall zwei oder auch mehrere Male wahrgenommen (Wiederhall, Echo). 4) Wenn man zwei Hohlspiegel in ziemlicher Entfernung von einander so gegen einander gerichtet aufstellt, daß ihre Axen (die Axe eines Spiegels ist eine gerade Linie, welche durch die Mitte des Spiegels und den Mittelpunkt der Kugel geht, von welcher der Spiegel ein Theil der Oberfläche ist) in dieselbe gerade Linie fallen, und legt in den einen Brennpunkt (derjenige Punkt der Axe, welcher von dem Spiegel um den halben Radius absteht) eine Taschenuhr, so hört man das leise Ticken derselben deutlich in dem Brennpunkte des anderen Spiegels, wenngleich es an keiner anderen Stelle, welche von der Uhr gleichweit entfernt ist, wahrgenommen wird.

Die Ursache für die Erscheinung in 1 kann offenbar nur in der Begrenzung des Raumes, also in den Wänden des Zimmers gesucht werden. Die Schallstrahlen, welche sich von dem Sprechenden bis zu den Wänden durch die Luft fortgepflanzt haben, müssen an denselben ein anderes Verhalten annehmen, als wenn sie sich auch noch ferner ungestört durch die Luft weiter verbreiten könnten. Wir haben nämlich gesehen, daß bei der

Digitized by Google

Fortpflanzung des Schalles in demſelben Mittel der Vorgang folgender iſt. Die ſchwingenden Theilchen wirken auf die in der Richtung des Schallſtrahls vor ihnen liegenden ruhenden Theilchen, und ſetzen dieſe dadurch in Bewegung, in der entgegengeſetzten Richtung wirken ſie aber auch zugleich vermöge ihrer Elaſticität auf ſolche, welche ſchon in Bewegung ſind, und bringen dieſe dadurch zur Ruhe. Die Wellen können ſich demnach nur von dem ſchallenden Körper weg verbreiten. Wenn ſich dagegen die ſchwingende Bewegung bis zur Grenzfläche zweier verſchiedenen Medien fortgepflanzt hat, ſo theilen zwar auch die äußerſten Theilchen des erſten Mittels den erſten Theilchen des zweiten Mittels Bewegung mit, aber ſie werden nicht durch die Rückwirkung derſelben gerade wegen der Verſchiedenartigkeit der Medien in Ruhe verſetzt, ſondern es bleibt ihnen entweder ein Theil ihrer Bewegung nach Vorwärts übrig, oder ſie erhalten eine Bewegung nach Rückwärts. In beiden Fällen müſſen ſie aber dieſe Bewegung auch wieder den ſchon zur Ruhe gekommenen und auf dem Schallſtrahle vor ihnen liegenden Theilchen mittheilen. An der Grenzfläche zweier verſchiedenartiger Medien müſſen ſich alſo ſtets zwei Wellen bilden, von welchen ſich die eine in das neue Mittel fortpflanzt, während die andere in das alte Mittel zurückkehrt. Von der zurückkehrenden Welle ſagt man, ſie ſei *zurückgeworfen* oder *reflectirt*. In Beziehung auf die Richtung der zurückgeworfenen Wellen lehrt die Erfahrung, und kann auch theoretiſch begründet werden, *daß der reflectirte Schallſtrahl mit der Trennungsfläche beider Medien denſelben Winkel bildet, wie der einfallende*. An den Wänden des Zimmers bilden ſich alſo Schallwellen in das Zimmer zurück, und bei der kurzen Zeit, welche bei der gefundenen Fortpflanzungsgeſchwindigkeit der Schall braucht, um von dem Sprechenden zu den Wänden des Zimmers, und von da zurück zu den Ohren der Zuhörer zu gelangen, iſt erſichtlich, daß die unmittelbaren und die reflectirten Schallwellen faſt zu der nämlichen Zeit die Ohren der Zuhörer treffen, und dadurch eine verſtärkte Wirkung auf dieſelben hervorbringen. In der zweiten der mitgetheilten Erfahrungen wird der Unterſchied der Wege der directen und reflectirten Wellen größer, wodurch die letzteren auch erſt ſpäter zum Ohre gelangen können, ſo daß ihre Wirkung höchſtens nur noch theilweiſe mit derjenigen der erſteren zuſammenfällt, theilweiſe aber auch erſt eintritt, nachdem die andere bereits aufgehört hat, wodurch ſich das Nachklingen, welchem man den Namen *Nachhall* beigelegt hat, hinlänglich erklärt. Auch der *Wiederhall* oder das *Echo* iſt eine Folge der Reflexion des Schalles, nur muß hier die Entfernung der reflectirenden Fläche offenbar ſo groß werden, daß die reflectirten Schallſtrahlen erſt dann unſer Ohr treffen, wenn die Einwirkung der directen Schallſtrahlen bereits aufgehört hat. Es wäre nun zunächſt dieſe Entfernung zu beſtimmen. Man nimmt an, daß unſer Ohr neun verſchiedene Schälle in der Secunde von einander unterſcheiden könne, darnach wäre alſo für die Wahrnehmung *eines* geſonderten Schalles $\frac{1}{9}$ Secunde Zeit nöthig. Der reflectirte Schallſtrahl darf demnach erſt $\frac{1}{9}$ Secunde ſpäter zu unſerem Ohre gelangen, als der directe, wenn wir die Einwirkungen beider als getrennte Schälle wahrnehmen ſollen. In $\frac{1}{9}$ Secunde legt der Schall aber einen Weg von 120 Fuß zurück, und da ſich dieſer Weg in den Hingang zu der reflectirenden Fläche und den Zurückgang zu dem

Digitized by Google

Beobachter theilt, so muß also die reflectirende Fläche wenigstens 60 Fuß von dem Orte der Schallerregung entfernt sein. Manchmal wird von einem Echo nicht nur ein, sondern zwei oder mehrere unmittelbar hinter einander hervorgerufene Schälle wiederholt, weßhalb man auch die Echos in ein-, zwei- u. s. w. sylbige eintheilt. Bei einem zweisylbigen Echo darf also die erste Sylbe erst dann wiederholt werden, nachdem die directe Einwirkung beider Sylben auf unser Ohr aufgehört hat, d. h. erst $\frac{1}{3}$ Secunde später, als die erste ausgesprochen wurde. Der das Echo bewirkende reflectirte Schallstrahl muß demnach noch einmal so lange unterwegs gewesen sein, als bei dem einsylbigen Echo, oder die reflectirende Fläche muß noch einmal so weit oder 120 Fuß entfernt sein. Bei dem dreisylbigen Echo muß diese Entfernung wenigstens 3×60 oder 180 Fuß betragen, u. s. w. Soll aber ein und derselbe Schall nicht nur einmal, sondern zwei oder mehrere Male wiederholt werden (einfaches, zweifaches u. s. w. Echo), so kann dies offenbar nur dadurch geschehen, daß nicht eine einmalige, sondern eine wiederholte Reflexion stattfindet, es sind demnach auch verschiedene reflectirende Flächen dazu erforderlich; doch muß ihre Zahl nicht nothwendig der Anzahl der Wiederholungen gleich sein, und es läßt sich z. B. leicht denken, wie ein vielfaches Echo zwischen zwei entfernten und parallelen reflectirenden Flächen entstehen kann. Berühmt gewordene Echos sind am Lurleyfelsen zwischen Bingen und Coblenz (17fach), auf dem Schlosse Simonetta bei Mailand (56fach), bei Adersbach in Böhmen (7sylbig und 3fach), im Alterthume am Grabmal der Metella, Gemahlin des Crassus, soll ein Echo gewesen sein, welches den Anfang der Aeneïde arma virumque cano achtmal wiederholt haben sol.

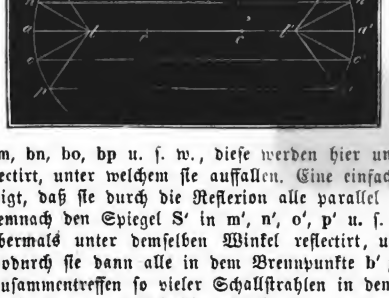


Fig. 32.

Was endlich den in 4 mitgetheilten Versuch betrifft, so seien S und S' (Fig. 32) die beiden Hohlspiegel, aa' ihre gemeinschaftliche Axe, b und b' die Brennpunkte. Die Uhr befinde sich in b. Von derselben fallen auf den Spiegel S Schallstrahlen, wie bm, bn, bo, bp u. s. w., diese werden hier unter demselben Winkel reflectirt, unter welchem sie auffallen. Eine einfache geometrische Betrachtung zeigt, daß sie durch die Reflexion alle parallel der Axe aa' werden, und demnach den Spiegel S' in m', n', o', p' u. s. w. treffen; hier werden sie abermals unter demselben Winkel reflectirt, unter welchem sie auffallen, wodurch sie dann alle in dem Brennpunkte b' zusammentreffen. Durch das Zusammentreffen so vieler Schallstrahlen in demselben Punkte wird dann natürlich die an sich schwache Wirkung der einzelnen Strahlen bedeutend verstärkt, wodurch sich die Erscheinung hinlänglich erklärt. Ganz ähnlich verhält es sich mit den s. g. Sprachgewölben oder Flüstergallerien, d. h. Räumen, in welchen man einen an einem gewissen Orte erregten schwachen Schall an einem anderen entfernten Orte deutlich hört, während man ihn an anderen, weit näheren Orten wenig oder gar nicht hören kann. Zu den bekannteren, hierher gehörigen Beispielen, in welchen

Digitized by Google

wohl die Baumeister gar nicht an die Errichtung von Sprachgewölben dachten, gehören die Kuppel der Paulskirche in London, in welcher man eine Taschenuhr, welche sich an dem einen Ende befindet, an dem anderen Ende schlagen hört, die Gallerie in der Kirche zu Gloceſter, auf welcher sich zwei Personen in einer Entfernung von 150 Fuß leise mit einander unterhalten können, die Kathedralkirche zu Girgenti in Sicilien, in welcher man, wenn an der Thüre, die aber nicht offen sein darf, leise gesprochen wird, das Gesprochene deutlich am anderen Ende versteht, während man kaum 10 Schritte von der Thür Nichts davon hört. Wollte man ein Sprachgewölbe absichtlich errichten, so würde man seinen Zweck erreichen müssen, wenn man ihm eine elliptische Wölbung gäbe, da dann alle Schallstrahlen, welche von dem einen Brennpunkte ausgehen, von dem Gewölbe nach dem anderen Brennpunkte reflectirt werden. Nach der Sage gehört auch das Ohr des Dionysius in den Steinbrüchen von Syrakus hierher, eine Grotte, die als Gefängniß diente, und welche von dem Tyrannen so eingerichtet gewesen sei, daß er in einem Zimmer, welches sich über dem Raume befand, in welchem die Gefangenen waren, Alles hören konnte, was diese sprachen. Die Wölbung der Grotte soll paraboliſch gewesen sein, und der Horcher mußte sich demnach in dem Brennpunkte des paraboliſchen Raumes befunden haben, da, weil die Reflexion unter demselben Winkel geschieht, unter welchem der Schallstrahl auffällt, alle Schallstrahlen, welche parallel mit der Are des paraboliſchen Raumes auf die Grenzfläche desſelben auffallen, nach der Zurückwerfung in dem Brennpunkte zusammentreffen.

§. 160. **Fortsetzung; Sprachrohr, Hörrohr.** Von der Reflexion des Schalles hat man auch in folgenden zwei Instrumenten, dem Sprachrohr und dem Hörrohr, eine nützliche Anwendung gemacht. Das im Jahre 1670 von dem Engländer Samuel Morland erfundene Sprachrohr hat den Zweck, die menschliche Stimme nach einer bestimmten Richtung auf eine größere Entfernung, als gewöhnlich, hörbar zu machen, und ist deßhalb auf Schiffen und Thürmen in vielfachem Gebrauch.

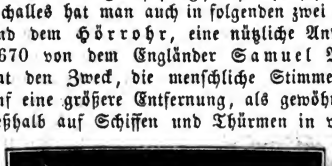


Fig. 33.

Es ist gewöhnlich eine coniſche Röhre mit einem Mundstück an der einen, und einer besonderen Erweiterung an der anderen Oeffnung, und wird von verschiedener Länge, sowie aus verschiedenen Stoffen (Weißblech, Messing, Pappdeckel u. s. w.) angefertigt. Der beabsichtigte Zweck wird nun eines Theils dadurch erreicht, daß die Schallstrahlen von dem Orte der Schallerregung nicht nach allen Richtungen, sondern nur in der Richtung des Sprachrohrs ausgehen können, anderen Theils aber, und zwar vorzugsweise, dadurch, daß die die inneren Seitenwände des Rohrs treffenden Schallstrahlen durch ein- oder mehrmalige Reflexion ihre ursprüngliche Richtung so verändern, daß sie bei ihrem Austritt aus dem Rohr alle der Are desſelben faſt parallel geworden sind, wie aus Fig. 33 zu erkennen ist. Die Folge davon ist natürlich eine bedeutende Verstärkung des Schalles in der Richtung dieſer Are; eine starke Männerstimme soll bei Anwendung eines Sprachrohrs bis auf eine Entfernung von 6000 Fuß verstanden und bis auf

Digitized by Google

eine Entfernung von 18000 Fuß noch gehört werden können, während sie nach der Erfahrung ohne Vermittlung des Sprachrohrs sich nur auf eine Weite von 800 Fuß verständlich machen kann.

Gegen Ende des 17. Jahrhunderts wird auch zuerst das Hörrohr erwähnt, dessen Zweck es ist, viele ankommende Schallstrahlen sich in einen kleinen Raum vereinigen, und den Schall so verstärkt in das Ohr gelangen zu lassen, weßhalb es von Schwerhörigen angewandt wird. Gewöhnlich hat es die Form eines hohlen paraboloischen Kegels, in dessen Spitze noch eine engere gekrümmte Röhre mündet, deren freies Ende in das Ohr gehalten wird. Die parallel mit der Are des paraboloischen Kegels einfallenden Schallstrahlen werden alle nach dem Brennpunkte desselben reflectirt, und von hier der gekrümmten Röhre zugeführt, an deren Wänden sie jedoch auch noch verschiedene Zurückwerfungen erleiden. Außerdem sind noch verschiedene andere Constructionen zu demselben Zwecke vorgeschlagen worden, ohne daß der Gebrauch des Hörrohrs bis jetzt eine allgemeine Verbreitung gefunden hätte, und zwar aus dem Grunde, weil es außer der Verstärkung des Schalles durch die wiederholten Reflexionen der Schallwellen in den Höhlungen und das Mittönen der Masse, aus welcher es gefertigt ist, ein unangenehmes, manchmal fast unerträglich werdendes Brausen und Summen erzeugt.

§. 161. **Interferenz des Schalles.** 1) Nach der Erfahrung vermögen wir, 2, 3 oder mehrere, zu gleicher Zeit an verschiedenen Orten erregte Schälle deutlich zugleich wahrzunehmen. 2) Man nehme eine sich nach Unten gabelförmig in 2 offene Arme theilende Röhre von Pappe oder Holz, über deren oberes Ende sich eine zweite, nach Oben sich erweiternde und mit einer schwach gespannten Membrane verschlossene Röhre auf und ab schieben läßt. Während man dann eine Chladni'sche, am besten quadratförmige Scheibe mit dem Bogen bestreicht, und zwar so, daß man eine ganz einfache Klangfigur (am zweckmäßigsten die 2 Diagonalen des Quadrats oder auch die 2 in der Mitte sich durchschneidenden Senkrechten auf die Seiten desselben) erhalten würde, halte man, nachdem man auf die Membrane feinen Sand gestreut hat, die Röhre mit dem einen offenen Ende der Gabel über die Mitte eines schwingenden Theils der Scheibe. Man wird den Sand in lebhafte Bewegung gerathen sehen. Dasselbe wird geschehen, wenn man je ein Ende der Gabel über Theile der Scheibe hält, welche gleichzeitig nach derselben Richtung schwingen. Wenn man sie aber über 2 Theile der Scheibe hält, welche nach entgegengesetzten Richtungen schwingen, also über solche, welche nur durch eine Knotenlinie von einander getrennt sind, so bleibt der Sand in Ruhe. 3) Man blase zu gleicher Zeit durch 2 Röhren von den beiden entgegengesetzten Seiten her gegen die Scheibe der Seebeck'schen Sirene, und zwar so, daß beide Luftströme in demselben Momente durch je zwei benachbarte Löcher der Scheibe gehen, so entsteht kein Ton und man hört höchstens ein Rauschen. Wird nur von einer Seite geblasen, wobei es ganz gleichgültig ist, von welcher, so entsteht stets der der Umdrehungsgeschwindigkeit entsprechende Ton. Werden endlich die beiden Röhren so gerichtet, daß der Luftstrom der einen durch eine Oeffnung geht, während derjenige der anderen, auf der entgegengesetzten Seite befindlichen auf einen Zwischenraum zwischen 2 Löchern trifft, so wird eine Verstärkung des Tones wahrgenommen. 4) Dreht man

Digitized by Google

eine angeschlagene Stimmgabel vor dem Ohre herum, so wird der Ton wahrgenommen, wenn die Fläche einer Zinke dem Ohre zugewandt ist, er verschwindet aber, so oft eine Kante dem Ohre gegenübersteht.

Aus der ersten Erfahrung ersehen wir, daß die durch 2 oder mehrere Körper gleichzeitig erregten Schallwellen sich unabhängig von einander ausbreiten, und zu unserem Ohre gelangen können. Auf ihrem Wege zu unserem Ohre müssen aber offenbar diese Schallwellen zusammentreffen, da sie sich alle von verschiedenen Orten aus nach demselben Punkte hin verbreiten. Da wir aber jeden einzelnen Schall grade so wahrnehmen, als ob der andere gar nicht da wäre, so müssen die kugelförmigen Schallwellen durch einander hindurch gehen können, ohne eine gegenseitige Störung ihrer Fortpflanzung zu erleiden. Dies ist jedoch keineswegs so zu verstehen, als ob das Zusammentreffen ganz wirkungslos bleibe. Es wird hier ganz dasselbe eintreten müssen, was wir schon in §. 145 für stehende Wellen erläutert haben. Man wird nämlich unterscheiden müssen, ob am Orte des Zusammentreffens die Theilchen in beiden Wellen im Zustande der Verdichtung, oder im Zustande der Verdünnung, oder in der einen Welle in dem ersteren und in der anderen in dem letzteren Zustande sich befinden. Im ersten Falle wird auch hier eine größere Verdichtung, in dem zweiten eine größere Verdünnung, und im dritten eine gänzliche oder theilweise Ausgleichung der Erfolg für die zusammentreffenden Theilchen sein müssen. An einer solchen Stelle wird also die Wirkung der einen Welle durch diejenige der anderen entweder verstärkt, oder aufgehoben, wenigstens geschwächt. Den experimentellen Beweis für die Richtigkeit dieser Auffassung liefert der zweite Versuch. Der erste Theil desselben zeigt nur, daß die Schwingungen der Scheibe der Luftsäule der gabelförmigen Röhre, und durch diese der Membrane mitgetheilt werden. Im zweiten Theile dringt in jedes der beiden Enden eine Schallwelle ein, aber da die Theile der Scheibe, über welche diese Enden gebracht sind, sich in gleichen Schwingungszuständen befinden, so werden dadurch auch die entsprechenden Luftschichten in beiden Röhrenenden gleichzeitig entweder in dem Zustande der Verdichtung oder der Verdünnung sein. Eine Schicht der Luftsäule in dem oberen gemeinschaftlichen Theile wird also durch die beiden Schenkel in demselben Augenblicke entweder verdichtet oder verdünnt, und wir sehen daher auch, da beide Einwirkungen stets in demselben Sinne erfolgen, den Sand in hüpfende Bewegung gerathen. Anders ist es in dem dritten Theile des Versuchs. Denn indem der eine Schenkel sich über einer Stelle der Platte befindet, deren Theilchen nach Oben schwingen, ist der andere über solchen Theilchen der Platte, die grade nach Unten schwingen. Daraus folgt, daß, wenn die Lufttheilchen in dem ersten Schenkel verdichtet werden, die entsprechenden im zweiten Schenkel eine Verdünnung erleiden. Wenn sich nun die Schwingungen bis zu dem gemeinschaftlichen oberen Theil fortgepflanzt haben, so treffen jetzt dort verdichtete Theilchen mit verdünnten zusammen, und es tritt daher eine Ausgleichung ein, weßhalb auch der Sand in diesem Falle in Ruhe bleibt. Diese gegenseitige Einwirkung der zusammentreffenden Theilchen verschiedener Wellen hat man mit dem Namen Interferenz (von dem englischen Zeitworte to interfere, sich einmischen) belegt.

In den mitgetheilten Principien der Interferenz müssen denn auch

Digitized by Google

die Versuche 3 und 4 ihre Erklärung finden. Was nun zunächst den Seebeck'schen Versuch betrifft, so gehen in dem Falle, in welchem kein Ton entsteht, von den beiden Löchern, durch welche geblasen wird, nach jeder Seite hin 2 Wellensysteme aus, und zwar so, daß durch das eine die zunächst liegenden Lufttheilchen stets verdichtet, durch das andere aber verdünnt werden; in dem Falle aber, in welchem der Ton verstärkt wird, pflanzen sich auf derjenigen Seite, auf welcher der eine Luftstrom durch die Zwischenstelle zurückgeworfen wird, 2 Wellensysteme fort, die beide gleichzeitig mit Verdichtungen anfangen. Von dem schon seit 1804 durch Vieth bekannten Versuch mit der Stimmgabel hat Wilh. Weber nachgewiesen, daß er ebenfalls durch die Interferenz der von den beiden Zinken der Stimmgabel ausgehenden Schallwellen eine hinreichende Begründung finde.

§. 162. **Stöße; Combinationstöne.** 1) Nimmt man 2 Stimmgabeln, die fast genau denselben Ton geben, und läßt dieselben zugleich tönen, so beobachtet man an dem durch ihr Zusammenklingen erzeugten Tone in regelmäßigen Zeitintervallen abwechselnd ein Anschwellen und eine Abnahme der Stärke. 2) Etwas Aehnliches wird bei einer angeschlagenen Glocke wahrgenommen, deren Ton einige Zeit lang andauert. 3) Werden 2 Orgelpfeifen, von welchen die eine die Quinte der anderen gibt, zu gleicher Zeit und gleich stark angeblasen, so vernimmt das Ohr nicht nur die beiden den Orgelpfeifen zugehörenden Töne, sondern neben ihnen auch noch die untere Octave des tieferen Tones.

Daraus, daß im ersten Versuche die beiden Stimmgabeln fast genau denselben Ton geben müssen, geht hervor, daß ihre Schwingungszahlen auch nur sehr wenig von einander verschieden sein dürfen. Wären die Schwingungszahlen ganz gleich, so müßte natürlich bei gleichzeitigem Anschlagen der Stimmgabeln stets die Anfänge jeder neuen von denselben erregten Schallwelle zusammenfallen, und auch bei der Ausbreitung derselben müßten stets die entsprechenden Theilchen in beiden Wellensystemen sich in gleichen Schwingungszuständen befinden, und die Wirkung könnte keine andere sein, als daß während der ganzen Dauer des Zusammenklingens der Ton der einen Gabel vollkommen gleichmäßig durch denjenigen der anderen Gabel verstärkt würde. Ist aber die Schwingungszahl der einen Gabel n, und die der anderen $n + 1$, so fangen nur bei dem Beginn jeder neuen Secunde beide Gabeln in demselben Momente eine neue Schwingung an, d. h. nach je n Schwingungen der ersten, und je $n + 1$ Schwingungen der zweiten Gabel. Die durch die Schwingungen auf die Luft ausgeübten Stöße, die sich dann als Schallwellen in derselben fortpflanzen, können demnach bei der sich gleichbleibenden Geschwindigkeit der Fortpflanzung nur in denselben Zeitintervallen gleichzeitig unser Ohr erreichen. Jedesmal aber, wenn dies der Fall ist, wird auf unser Ohr eine verstärkte Wirkung ausgeübt, muß also der Schall mit größerer Stärke gehört werden, er muß anschwellen. Wären die Schwingungszahlen n und $n + 2$, so müssen in der Secunde nicht eine, sondern 2 solcher Anschwellungen statthaben, und es muß überhaupt die Zahl der Anschwellungen dem Unterschiede der Schwingungszahlen gleich sein. Wenn aber gefragt wird, wie sich dieselbe Erscheinung auch bei Glocken zeigen könne, da man es hier nur mit einem einzigen schallenden Körper zu thun habe, so muß man sich erinnern, daß eine Glocke nie als Ganzes, sondern nur in aliquoten Theilen schwingt

Digitized by Google

(§. 139). Allerdings müssen eigentlich alle diese Theile eine ganz gleiche Schwingungszahl haben. Dies kann jedoch nur so lange stattfinden, als die Glocke eine vollkommen symmetrische Gestalt, und eine durchaus gleichförmige Masse hat, eine Bedingung, die aber bei der Anfertigung derselben äußerst schwer zu erfüllen ist. In der Wirklichkeit also werden grade deßwegen die einzelnen schwingenden Theile einer Glocke nicht genau übereinstimmende Schwingungszahlen zeigen, und müssen das besprochene Phänomen ebenso gut hervorrufen, wie die gleichzeitig angeschlagenen Stimmgabeln des ersten Versuchs. Das periodische Anschwellen und Nachlassen der Töne bezeichnet man gewöhnlich mit dem Worte Schwebungen, die Anschwellungen mit dem Worte Stöße. Auf die Stöße hat Scheibler (Kaufmann in Crefeld) sowohl eine Methode des Stimmens begründet, durch welche dasselbe unabhängig von der feinen Ausbildung des musicalischen Gehörs gemacht wird, als auch eine Methode, die absolute Schwingungszahl eines Tones zu finden. Soll z. B. eine Saite genau auf den Ton einer Stimmgabel gestimmt werden, so verschob er einen beweglichen Steg unter der Saite so lang, bis dieselbe in der Secunde nur wenige, leicht zählbare Stöße gab, z. B. 4. Nun erhält man aber 4 Stöße, wenn die Schwingungszahl der Saite sowohl um 4 größer, als auch um 4 kleiner ist, als diejenige der Gabel. Es mußte daher in der Nähe des ersten Punktes sich noch ein zweiter Punkt finden lassen, so daß, wenn der Steg unter denselben gebracht wurde, die Saite abermals bei dem Zusammenklingen mit der Stimmgabel 4 Stöße gab. Wird dann die Entfernung beider Punkte halbirt, so ist die genaue Länge der Saite gefunden, bei welcher sie bei unverändert bleibender Spannung denselben Ton gibt, wie die Gabel. Um die absolute Schwingungszahl eines Tones zu finden, verfertigte sich Scheibler 52 Stimmgabeln, von welchen jede folgende einen etwas höheren Ton, als die vorhergehende, die letzte aber genau die Octave der ersten angab. Nun ließ er je 2 auf einander folgende zusammenklingen, und beobachtete die Anzahl der Stöße in der Secunde. Die Summe aller Stöße gab ihm offenbar den Unterschied der Schwingungszahlen des tiefsten Tones und seiner Octave. Dieser Unterschied war aber, da die Schwingungszahl der Octave stets doppelt so groß ist, wie diejenige des Grundtones, zugleich die wirkliche Schwingungszahl des tiefsten Tones. Eine andere Anwendung hat man noch gemacht zur Bestimmung der einzelnen Tonhöhen bei der gleichschwebenden Temperatur. Da nämlich bei derselben, um die Octaven rein zu erhalten, der nothwendig werdende Fehler auf alle Quinten gleichmäßig vertheilt wird, so müssen also auch immer je 2 auf einander folgende Quinten gleich viel Schwebungen geben. Indem man dies bei der Stimmung eines Instruments berücksichtigt, bekommt man eben die Tonverhältnisse, wie sie die gleichschwebende Temperatur, die daher auch ihren Namen erhalten hat, verlangt.

Wird die Differenz der Schwingungszahlen zweier zusammenklingenden Töne größer, so folgen die Stöße rascher auf einander, und von einer gewissen Größe dieser Differenz an so rasch, daß sie nicht mehr einzeln gezählt, und nicht als getrennte Eindrücke wahrgenommen werden können. So muß, wenn, wie im dritten Versuche, ein Ton und seine Quinte zusammentönen, jede zweite Schwingung des ersteren mit jeder dritten Schwingung der letzteren zusammenfallen. Bei einer so raschen Aufeinanderfolge

Digitized by Google

aber müssen die Stöße, ähnlich wie bei den verschiedenen Sirenen, die Empfindung eines besonderen Tones hervorrufen. Die Schwingungszahl dieses Tones ist natürlich der Anzahl der in einer Sekunde erfolgenden Stöße gleich, also in unserem angeführten Falle halb so groß, als die Schwingungszahl des tieferen Tones, weßhalb auch die untere Octave desselben vernommen wird. Die so entstehenden Töne, welche von den durch das Zusammenklingen zweier Töne hervorgerufenen Stößen erzeugt werden, nennt man Combinationstöne. Sie heißen auch Tartini'sche Töne, weil der Italiener Tartini sie zuerst (1754) in einer Schrift öffentlich besprochen hat; behauptet wird jedoch, daß ein Deutscher, Andreas Sorge, sie schon im Jahre 1745 entdeckt habe.

§. 163. **Resonanz.** 1) Auf einem Stabe sind senkrecht zu dessen Längenrichtung 2 kreisförmige Scheiben angebracht. Der Stab werde vertical gehalten, und beide Scheiben mit feinem Sande bestreut. Wird nun die eine derselben mit dem Violinbogen angestrichen, so entsteht auf beiden die dem erzeugten Tone entsprechende Klangfigur. 2) Eine dünne, rechteckige Holzplatte von gleichförmigem Gefüge ist an dem einen Ende befestigt, und an dem anderen durch eine Saite gespannt. Wird die Saite angestrichen, so geräth der auf die Platte gestreute Sand in Bewegung und bildet Knotenlinien. Diese bleiben aber selbst für denselben Ton sich nicht immer gleich, sondern hängen auch von der Richtung ab, in welcher die Saite durch das Bestreichen mit dem Violinbogen schwingt. Wird die Saite so angestrichen, daß sie vertical auf und ab schwingt, so bemerkt man zugleich, daß die Bewegung des aufgestreuten Sandes mehr eine hüpfende ist; schwingt aber die Saite mehr horizontal hin und her, so sieht man auch den Sand sich auf der Platte verschieben. Wird die Spannung der Saite verändert, und dadurch beim Bestreichen ein anderer Ton hervorgerufen, so ändert sich auch die entstehende Klangfigur. 3) Befinden sich 2 gespannte Saiten nahe bei einander, und geben beide entweder denselben Ton, oder gibt wenigstens die eine einen Ton, der auch durch die andere beim Schwingen in aliquoten Theilen erzeugt werden kann, setzt man dann auf die eine Saite Papierreiterchen, so werden diese beim Bestreichen der anderen Saite mit dem Violinbogen abgeworfen. Wenn aber die erste Saite nur beim Schwingen in aliquoten Theilen den Ton geben würde, so bleiben die grade auf den entsprechenden Schwingungsknoten befindlichen Reiterchen sitzen. 4) Hält man eine angeschlagene Stimmgabel frei in der Hand, so wird der Ton derselben kaum wahrgenommen; stemmt man sie aber mit dem Stiele gegen eine Tischplatte, so wird der Ton sogleich mit sehr vermehrter Stärke gehört. 5) Neben einer Glasglocke befinde sich eine Röhre von ziemlich großem Durchmesser, in welcher sich eine zweite verschieben läßt, so daß durch Ausziehen die Luftsäule verlängert oder verkürzt werden kann. Bei einer gewissen Länge der Luftsäule in dem Rohr wird man finden, daß der Ton der Glocke, die durch einen Violinbogen bestrichen wird, in hohem Grade verstärkt wird, während diese Verstärkung bei jeder anderen Länge der Luftsäule entweder gar nicht, oder nur in geringem Grade beobachtet wird.

Aus den 2 ersten Versuchen lernen wir, daß tönende Körper andere mit ihnen in unmittelbarer Verbindung stehende feste Körper in eine schwingende Bewegung versetzen können, und aus der Bildung von Klangfiguren müssen wir schließen, daß die hervorgerufenen Schwingungen keine fort-

Digitized by Google

schreitende, sondern stehende sind. Zugleich zeigt die hüpfende oder gleitende Bewegung des Sandes im zweiten Versuche, je nachdem die Saite vertical oder horizontal schwingt, daß bei den mitgetheilten Schwingungen alle einzelnen Theilchen nach Richtungen sich bewegen, welche mit jenen parallel sind, in denen sich auch die ursprünglich schwingenden Theile bewegen. Da also im ersten Versuch die mit dem Bogen bestrichene Saite transversal schwingt, so muß der Stab longitudinal, und die andere Scheibe ebenfalls wieder transversal schwingen. Daß sich die Schwingungen eines tönenden Körpers in einem anderen, mit ihm in unmittelbarer Berührung stehenden Körper, wenn dieser überhaupt in eine schwingende Bewegung vermöge seiner materiellen Beschaffenheit gerathen kann, fortpflanzen, hat Nichts Auffallendes. Wohl aber könnte man vermuthen, daß diese Fortpflanzung nur durch fortschreitende Wellen geschehen werde. Der erste Impuls, welchen der mitschwingende Körper von dem tönenden erhält, kann auch in dem ersteren nur eine fortschreitende Welle hervorrufen. Wenn diese aber bis an die Grenze des mitschwingenden Körpers gelangt ist, so kann sie, wie wir gesehen haben, nicht ungetheilt in das neue Mittel übergehen, sondern wird zum Theil zurückgeworfen (§. 159). Die zurückgeworfene Welle trifft dann auf ihrem Wege mit andern, die durch neue Impulse des tönenden Körpers hervorgerufen wurden, zusammen, und so werden auf ähnliche Weise, wie wir bei den schwingenden Luftsäulen in den Blasinstrumenten gesehen haben (§. 145), durch Interferenz der directen und reflectirten Wellen die ursprünglich fortschreitenden Wellen in stehende verwandelt.

Aus dem dritten Versuche ergibt sich, daß der mitschwingende Körper nicht einmal in unmittelbarer Verbindung mit dem tönenden zu stehen braucht. Der Vorgang kann hier kein anderer sein, als daß die durch den tönenden Körper in der Luft erzeugten fortschreitenden Wellen bei ihrer Verbreitung die andere Saite treffen, und daß die Schwingungen derselben durch die auf diese Weise in einem gewissen Zeitintervall regelmäßig wiederkehrenden und sie treffenden Stöße entstehen. Offenbar können die entstehenden Schwingungen der Saite nur dann regelmäßig erfolgen, wenn die auf einander folgenden Stöße auf die Saite immer in demselben Sinne einwirken, wenn also die Saite in dem Momente, wo sie getroffen wird, stets sich nicht nur in demselben Punkte ihrer Bahn befindet, sondern auch sich nach derselben Richtung hinbewegt. Daraus erklärt sich denn hinlänglich, warum der Versuch nur dann gelingt, wenn entweder beide Saiten denselben Ton geben, oder wenn wenigstens die eine einen Ton gibt, welcher auch durch die andere beim Schwingen in aliquoten Theilen erzeugt werden kann. Im ersten Fall werden beide Saiten zu einer Schwingung gleichviel Zeit brauchen, und jede neu ankommende Welle wird demnach die zweite Saite immer treffen, nachdem sie grade eine Schwingung vollendet hat. Im zweiten Fall macht die eine Saite 2, 3 u. s. w. Schwingungen, während die andere nur eine macht, und die fortschreitende Luftwelle trifft sie dann jedes Mal, nachdem sie grade 2, 3 u. s. w. Schwingungen zurückgelegt hat. Daß aber endlich auch die im mitschwingenden Körper entstandenen stehenden Wellen einen Schall zu erzeugen im Stande sind, zeigen die Versuche 4 und 5, denn die wahrgenommene Verstärkung des Tones läßt sich nur dadurch erklären, daß die mitschwingenden Körper ebenfalls tönen. Im letzten

Digitized by Google

Versuche sehen wir noch außerdem, daß die in der Luft fortschreitenden Schallwellen nicht nur einen festen Körper, auf welchen sie treffen, sondern auch eine begrenzte Luftsäule in stehende Schwingungen versetzen können. Warum die große Verstärkung des Tones nur bei einer bestimmten Länge des Rohrs eintritt, und zwar, wie sich bei näherer Ermittlung findet, bei derjenigen Länge, bei welcher die Luftsäule auch für sich den Ton des schallenden Körpers hervorbringen könnte, findet in dem über den dritten Versuch Gesagten seine hinreichende Erklärung.

Diese durch das Mitschwingen eines anderen Körpers hervorgehende Verstärkung des Tones eines schallenden Körpers nennt man das Mittönen oder die Resonanz. Von der Resonanz hat man in der Musik auch eine praktische Anwendung bei den Saiteninstrumenten gemacht. Die Saiten bieten der Luft eine zu geringe Fläche dar, um hinreichend viele Theile derselben kräftig zu erschüttern, und vermögen deßhalb für sich nur einen schwachen Ton zu erzeugen. Man erzielt aber eine bedeutende Verstärkung dieses an sich schwachen Tones dadurch, daß man die Saite über einer großen Fläche von feinfibrigem Holze, dem s. g. Resonanzboden, ausspannt. Da aber der Resonanzboden alle, auch die tiefsten, Töne eines Instrumentes gleichmäßig verstärken soll, so muß er nothwendig hinlänglich groß und nicht allzu dick sein, und auch die gehörige Elasticität besitzen, um alle Arten von Schwingungen mit Leichtigkeit annehmen zu können.

§. 164. **Das menschliche Gehörorgan.** Bis jetzt haben wir die Fortpflanzung der Schallwellen bis zu unserem Ohre verfolgt, und es bleibt demnach noch übrig, den weiteren Verlauf derselben, bis sie als Schall uns zum Bewußtsein kommen, in Betracht zu ziehen. Dazu ist aber zunächst eine nähere Kenntniß unseres Gehörorgans erforderlich. Dasselbe besteht aus 3 Haupttheilen, nämlich dem äußeren Ohr, der Trommelhöhle, und dem Labyrinthe. Das äußere Ohr geht durch den Knochen des Schläfenbeins hindurch, die Trommelhöhle ist von allen Seiten von Knochenwänden umgeben, und auch das Labyrinth ist in den sehr harten und festen Theil des Schläfenbeins, welcher das Felsenbein heißt, eingewachsen. Am äußeren Ohr unterscheidet man 2 Theile, die Ohrmuschel und den Gehörgang. Die Ohrmuschel ist ein biegsamer Knorpel, dessen Krümmungen den Zweck haben, den Schall in jeder Richtung aufzufangen, zu verstärken, und zu dem inneren Organ fortzuführen. Von der Ohrmuschel aus geht der Gehörgang in den Kopf hinein, nicht in horizontaler Richtung, sondern etwas aufwärts, um zu verhindern, daß Etwas hineinfalle, oder drin liegen bleibe. Unter der häutigen Decke des Gehörganges befinden sich kleine Drüsen, die eine gelbe, klebrige Substanz, das Ohrenschmalz, in den Gehörgang absetzen, durch welche der Gehörgang glatt und geschmeidig erhalten wird. An den Gehörgang schließt sich die Trommelhöhle an. Beide sind durch eine Membrane, das Trommelfell, welche durch einen Muskel mehr oder weniger gespannt werden kann, von einander geschieden. Die Trommelhöhle ist eine 4 Linien weite, unregelmäßig elliptische Höhle. In ihr befinden sich 4 Knöchelchen, welche von ihrer Gestalt die Namen Hammer, Ambos, das linsenförmige Knöchelchen (auch das runde Knöchelchen des Sylvius genannt) und Steigbügel führen. Der Stiel des Hammers ist mit dem Trommelfell, und das dicke Ende mit dem Ambos verbunden; der Ambos steht

Digitized by Google

einem Zahne mit 2 Wurzeln ähnlich, mit der kürzeren Wurzel stützt er sich gegen die Knochenmasse des Kopfes, und am Ende der anderen Wurzel ist er durch das linsenförmige Knöchelchen mit dem Steigbügel verbunden. Diese Knöchelchen bilden gleichsam ein System von Hebeln, und sind mit eigenen Muskeln zu ihrer Bewegung versehen. Aus der Trommelhöhle führt die Eustachische Röhre nach der Mundhöhle. Durch diese Röhre strömt denn auch die Luft in die Trommelhöhle, wird fortwährend in derselben erneuert, und so mit der äußeren im Gleichgewicht gehalten. An die Trommelhöhle schließt sich endlich die innerste Höhle des Ohres, das Labyrinth, an. Die Verbindung beider ist durch 2 Oeffnungen, das ovale Fenster und das runde Fenster, hergestellt. Das ovale Fenster ist durch die Fußplatte des Steigbügels, das runde durch eine Membrane geschlossen. In dem Labyrinthe unterscheidet man als die beiden Haupttheile den Vorhof mit den 3 halbkreisförmigen Röhren und die Schnecke. Das ovale Fenster führt in den ersteren, das runde in die letztere. Das Labyrinth ist mit einem wässerigen Stoffe angefüllt, der durch gewisse Organe beständig erneuert wird. Die 3 halbkreisförmigen Röhren sind Canäle, welche in dem Vorhofe entstehen und wieder dahin zurückführen. In denselben befinden sich häutige Röhren, die sich in den dickeren Enden der Canäle zu eiförmigen Blasen (Ampullen) erweitern, und sich in dem Vorhofe in einem gemeinsamen Sacke vereinigen. Die Schnecke ist der Länge nach durch eine Scheidewand in 2 Theile getheilt. Ueber den inneren Flächen des ganzen Labyrinths verbreiten sich die Verzweigungen des in das Gehirn gehenden Gehörnerves, der sich namentlich in der Schnecke in sehr feine Fäden theilt.

Den Vorgang bei der Wahrnehmung eines Schalles müssen wir uns nun folgendermaßen denken. Die in den Gehörgang eindringenden Schallwellen versetzen das Trommelfell in Schwingungen. Diese werden nun eines Theils der Luft in der Trommelhöhle mitgetheilt, die dann die das runde Fenster verschließende Membrane zum Schwingen veranlaßt. Dadurch geräth dann auch das Wasser der Schnecke in schwingende Bewegung. Anderen Theils wird durch die Schwingungen des Trommelfells das Hebelsystem der in der Trommelhöhle befindlichen Knöchelchen so in Bewegung versetzt, daß der Steigbügel abwechselnd in das ovale Fenster dringt. Die auf das Wasser des Vorhofs ausgeübten wiederkehrenden Stöße bringen auch in diesem Schwingungen hervor. Die Schwingungen des Labyrinthwassers aber treffen die Verästelungen des Gehörnervs, und erwecken in demselben durch ihre Einwirkung eine Empfindung, und diese ist es, die uns in dem Gehirn auf eine uns freilich noch unerklärliche Weise als Schall zum Bewußtsein kommt.

Aus der Erfahrung, daß man den Ton einer Stimmgabel hört, welche man an die Zähne angesetzt hat, geht hervor, daß die Schallschwingungen sich auch durch die feste Masse des Kopfes verbreiten, und auf diese Weise das Wasser des Labyrinths in Schwingungen versetzen können.

Eine Sprengung des Trommelfells hat wohl gewöhnlich Harthörigkeit, aber nicht absolute Taubheit zur Folge, indem immer noch ein Weg (die Luft in der Trommelhöhle) bleibt, auf welchem die Schallschwingungen sich bis zu dem Labyrinthwasser fortpflanzen können. Sind aber beide Wege unbrauchbar geworden, dadurch, daß die Membrane des runden Fensters

Digitized by Google

verletzt, und der Steigbügel von dem ovalen Fenster losgerissen ist, dann ist die Wahrnehmung des Schalles durch das Ohr nicht mehr möglich.

Fünfter Abschnitt.

Lehre von dem Lichte.

§. 165. **Licht; Optik.** Die Erfahrung lehrt, daß zur Wahrnehmung der Gegenstände der Sinnenwelt nicht der bloße Besitz des Gesichtsorgans oder Auges hinreicht. Dasjenige nun, was dem Gesichtssinne die Wahrnehmung sinnlicher Gegenstände möglich macht, nennen wir Licht. Ueber die Natur und das Wesen desselben bestehen verschiedene Ansichten, welche indessen erst in der Folge näher erläutert werden sollen, da wir bei den zunächst folgenden Erscheinungen diese Frage noch füglich unerörtert lassen können. Die Lehre von den Gesetzen, nach welchen das Licht wirksam ist, heißt Optik (ὄπτω ich sehe).

§. 166. **Selbstleuchtende, dunkle Körper.** Die Erfahrung lehrt auch, daß gewisse Körper anwesend sein müssen, wenn wir mit unserem Auge die uns umgebenden Körper wahrnehmen sollen. Solche Körper nun, welche die Wahrnehmung anderer durch den Gesichtssinn vermitteln, werden selbstleuchtende Körper genannt. Zu diesen gehören: die Sonne, die Fixsterne, vielleicht auch die Cometen; alle mit Flamme brennenden und alle glühenden Körper; die phosphorescirenden Körper, welche schon bei gewöhnlicher Temperatur ein schwaches Licht verbreiten; gewisse Thiere, z. B. der Johanniskäfer, der surinamische Laternenträger (auch das nächtliche Leuchten des Meeres soll durch leuchtende Thierchen erzeugt werden, vergl. Humboldt Ansichten der Natur Bd. II. p. 68 seq.); gewisse modernde und faulende Körper des Pflanzen- und Thierreichs (faules Holz, faulende Fische); die Lichtsauger oder Lichtmagnete, d. h. Körper, welche durch Insolation oder Bestrahlung durch das Sonnenlicht selbstleuchtend geworden sind (weißgebrannte Austerschalen, der Bologneser Leuchtstein, welchen man erhält, wenn man zerstoßenen Schwerspath mit Eiweiß vermengt, und dann stark ausglüht, u. a.).

Alle übrigen Körper, welche nur dadurch für uns sichtbar werden, daß das Licht von selbstleuchtenden Körpern auf sie auffällt, und von ihnen nach unserem Auge zurückgeworfen wird, werden dunkle Körper, und im Zustande der Sichtbarkeit beleuchtete Körper genannt.

§. 167. **Durchsichtige, undurchsichtige und durchscheinende Körper.** Bringt man ein Stück Glas zwischen das Auge und einen sichtbaren Gegenstand, so können wir denselben auch dann noch sehen. Nimmt man aber statt des Glases ein Stück Blei, so wird der Gegenstand nicht mehr von uns wahrgenommen. Es folgt hieraus, daß einige Körper für das Licht durchdringlich sind, andere nicht. Die ersteren nennt man durchsichtig, die letzteren undurchsichtig. Es gibt verschiedene Grade der Durchsichtigkeit; weniger durchsichtige Körper heißen durchscheinend. Kein Körper ist vollkommen durchsichtig oder vollkommen undurchsichtig. Selbst der

Digitized by Google

durchsichtigste Körper wird in dicken Schichten mehr oder weniger undurchsichtig (Wasser), ebenso wie der undurchsichtigste in dünnen Schichten wenigstens durchscheinend wird (Gold in ganz dünne Blättchen ausgeschlagen).

Erstes Kapitel.

Von der Verbreitung des Lichtes in demselben Mittel.

§. 168. **Verbreitung nach allen Richtungen.** Eine Kerzenflamme oder jeder andere leuchtende Körper wird von uns von allen Seiten aus gesehen, so lange sich kein undurchsichtiger Körper zwischen unserem Auge und dem leuchtenden Körper befindet. Es muß sich folglich das Licht von jedem leuchtenden Punkte aus nach allen Richtungen hin verbreiten.

§. 169. **Verbreitung in geraden Linien.** Ist unser Auge und ein leuchtender Punkt in demselben durchsichtigen Körper, z. B. der atmosphärischen Luft, und befindet sich ein undurchsichtiger Körper in der geraden Linie, welche unser Auge mit dem leuchtenden Punkte verbindet, so können wir den leuchtenden Punkt nicht sehen. Die Verbreitung des Lichtes geschieht demnach in demselben durchsichtigen Mittel nur nach geraden Linien. In der Feldmeßkunst macht man von diesem Satze praktische Anwendung. Beim Abstecken von geraden Linien schließt man nämlich so, daß zwei Stangen und unser Auge sich nur dann in gerader Linie befinden, wenn unserem Auge die eine Stange durch die andere verdeckt wird.

Da nach §. 168 von einem leuchtenden Punkte nach allen Richtungen hin Lichtstrahlen ausgehen, so bilden sie um den leuchtenden Punkt herum gewissermaßen eine Strahlenkugel. Fängt man aber einen Theil der von einem leuchtenden Punkte ausgehenden Lichtstrahlen mit einer Fläche auf, so bilden diese je nach der Gestalt der Fläche entweder einen Strahlenkegel oder eine Strahlenpyramide.

Während man die ganze Lehre von dem Lichte unter dem Namen Optik begreift, versteht man unter Optik im engeren Sinne die Lehre von der geradlinigen Verbreitung des Lichtes.

§. 170. **Die optische Kammer.** Wenn wir uns in einem verfinsterten Zimmer befinden, in dessen Fensterladen eine feine Oeffnung angebracht ist, und außerhalb des Zimmers vor der Oeffnung sind leuchtende oder beleuchtete Gegenstände, so gewahren wir auf einer der Oeffnung gegenüberstehenden Wand die verkehrten Bilder dieser Gegenstände. Je nachdem man die Entfernung der auffangenden Wand von der Oeffnung ändert, ändert sich auch die Größe des Bildes. Wird die Oeffnung größer gemacht, so wird das Bild undeutlicher, d. h. die Umrisse der einzelnen Theile vermischen sich immer mehr und mehr. Bei einer gewissen Größe der Oeffnung entsteht gar kein wahrnehmbares Bild mehr. ab (Fig. 34) sei der beleuchtete äußere Gegenstand, AB der Fensterladen, o die Oeffnung desselben, und A'B' die auffangende Wand. Von den Lichtstrahlen, welche von dem Punkte a

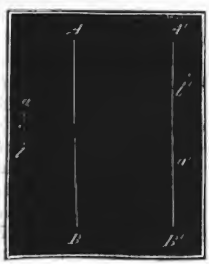


Fig. 34.

Digitized by Google

ausgehen, wird einer durch o hindurchgehen, und nach a' gelangen. In a' wird also ein Bild des Punktes a entstehen. Ebenso wird von b ein Lichtstrahl durch o nach b' gelangen, und in b' wird ein Bild des Punktes b entstehen. Die Strahlen, welche von den zwischen a und b liegenden Punkten ausgehen, werden nach den zwischen a' und b' liegenden Punkten gelangen, und zwar je näher ein Punkt bei a liegt, desto näher wird sein Bild bei a' sein. Auf diese Weise entsteht also auf der Wand A'B' nur als Folge der geradlinigen Verbreitung des Lichts nach allen Seiten hin ein verkehrtes Bild a'b' des äußeren Gegenstandes ab. Es geht zu gleicher Zeit aus dieser Betrachtung hervor, daß, so lange der äußere Gegenstand ab seine Lage zur Oeffnung o beibehält, das verkehrte Bild a'b' desselben desto größer werden muß, je weiter die Wand A'B' von der Oeffnung o entfernt wird. Das Bild muß überhaupt nach geometrischen Gründen so groß wie der Gegenstand sein, wenn die Entfernung der Wand von der Oeffnung der Entfernung des Gegenstandes von der Oeffnung gleich ist; ist dagegen die Entfernung des Gegenstandes von der Oeffnung größer, so ist das Bild kleiner und umgekehrt, und zwar so, daß sich die Größen des Bildes und des Gegenstandes stets zu einander verhalten, wie ihre Entfernungen von der Oeffnung.

Bei einer größeren Oeffnung gehen mehr Lichtstrahlen durch dieselbe von jedem Punkte des beleuchteten Gegenstandes ab, und breiten sich auf der Wand A'B' über eine Fläche aus, welche um so größer wird, je größer die Oeffnung ist. Je größer aber diese beleuchteten, den einzelnen Punkten von ab entsprechenden Flächen sind, desto mehr derselben müssen offenbar auf der Wand A'B' übereinander fallen, und je mehr solcher verschiedenen Punkten von ab entsprechenden Flächen an einer Stelle übereinander fallen, desto weniger kann diese Stelle das Bild *eines* dieser Punkte darstellen, desto undeutlicher wird also das Bild.

§. 171. **Schatten, Kernschatten und Halbschatten, Schlagschatten.** Es ist schon oben gezeigt, daß nach denjenigen Stellen, zwischen welchen und einem leuchtenden Körper in gerader Linie ein undurchsichtiger Körper sich befindet, keine Lichtstrahlen gehen. Man sagt von diesen Stellen, sie seien im *Schatten*. Setzen wir zunächst nur einen leuchtenden Punkt voraus, so wird wegen der geradlinigen Verbreitung des Lichtes der Schattenraum offenbar dadurch gefunden, daß man von dem leuchtenden Punkte gerade Linien nach allen Punkten am äußersten Umfange des Körpers zieht, und sie über den Körper hinaus verlängert. Der hinter dem Körper zwischen diesen Linien eingeschlossene Raum ist der Schattenraum. Er wird also in unserem angenommenen Falle die Gestalt eines abgestumpften Kegels oder einer abgestumpften Pyramide haben müssen, und sich bis in das Unendliche erstrecken. Haben wir aber einen leuchtenden Körper, so gibt es hinter dem undurchsichtigen Körper 1) einen Raum, in welchen von gar keinem Theile des leuchtenden Körpers Lichtstrahlen gelangen, und 2) einen den ersteren umschließenden Raum, in welchen wenigstens nicht von allen Punkten des leuchtenden Körpers Lichtstrahlen gelangen. Den ersteren Raum nennt man den *Kernschatten*, den letzteren den *Halbschatten*. Ein im Kernschatten befindliches Auge kann den leuchtenden Körper gar nicht, ein im Halbschatten befindliches kann ihn wenigstens nicht ganz sehen. In diejenigen Theile des Halbschattens,

Digitized by Google

welche den Kernschatten zunächst umgeben, fallen die wenigsten, in die weiter davon entfernten desto mehr Lichtstrahlen, je weiter sie eben von dem Kernschatten entfernt sind. Deßwegen muß im Halbschatten ein allmähliger Uebergang vom vollen Schatten zum vollen Lichte stattfinden. Der Schatten muß offenbar um so dunkler erscheinen, je stärker der ihn umgebende Raum erleuchtet ist, d. h. das hellste Licht wirft den dunkelsten Schatten. Da der Schatten durch die Strahlen begrenzt wird, welche am äußersten Rande des undurchsichtigen Körpers vorbeifahren, so muß seine Gestalt, Lage und Größe von der Gestalt und Größe des leuchtenden und beleuchteten Körpers, und von ihrer Entfernung abhängen. Es muß also möglich sein, ihn jedesmal durch geometrische Construction zu bestimmen. Nehmen wir z. B. an, daß der leuchtende Körper sowohl, wie der undurchsichtige kugelförmig seien, so hat der Kernschatten die Gestalt eines in das Unendliche gehenden abgekürzten Kegels, oder eines in das Unendliche gehenden Cylinders, oder eines Kegels, je nachdem die leuchtende Kugel kleiner, eben so groß oder größer ist, als die undurchsichtige. Der Halbschatten erstreckt sich immer bis in das Unendliche. Daß solche sich in das Unendliche erstreckende Schattenräume nicht wahrgenommen werden, rührt davon her, daß das sie begrenzende Licht mit der Entfernung vom leuchtenden Körper immer schwächer wird, so daß es sich zuletzt von dem Schatten gar nicht mehr unterscheidet. Wichtigkeit der genauen Kenntniß der Schattenräume für die Bestimmung der Sonnen- und Mondsfinsternisse.

Schlagschatten heißt der auf eine Fläche projicirte Schatten eines undurchsichtigen Körpers. Sonnenuhren, chinesisches Schattenspiel.

§. 172. Die Beleuchtung abhängig von der Intensität des Lichtes. Stellen wir in einem dunkeln Raume derselben Fläche eines undurchsichtigen Körpers in gleicher Entfernung nach einander eine brennende Wachskerze und eine brennende Spirituslampe gegenüber, und zwar in ganz gleicher Lage zur Fläche, so erscheint uns bekanntlich die Fläche im ersteren Falle weit heller, als im letzteren.

Nehmen wir der Einfachheit halber an, die beiden Flammen hätten vollkommen gleichen Umfang, dann gelangen zur Fläche in beiden Fällen offenbar gleich viele Lichtstrahlen. Die verschiedene Wirkung derselben auf die Fläche kann daher nur in einer verschiedenen Stärke oder Intensität des Lichtes, welches von der Wachskerze und von der Spirituslampe ausgeht, begründet sein. Die Erleuchtung einer Fläche hängt demnach von der Intensität des Lichtes ab, welches der leuchtende Körper aussendet; sie muß desto größer sein, je größer diese Intensität ist, und zwar müssen beide der Natur der Sache nach in gleichem Verhältnisse ab- und zunehmen.

§. 175. Die Beleuchtung abhängig von der Entfernung von der Lichtquelle. Bringen wir in einem dunkeln Raume dieselbe Fläche, ohne ihre Lage zur Lichtquelle zu ändern, nach und nach in immer größere Entfernungen von derselben, so lehrt die Erfahrung, daß die Helligkeit der Fläche desto mehr abnimmt, je größer ihre Entfernung von der Lichtquelle ist. Bei gleicher Intensität des Lichtes hängt also die Erleuchtung einer Fläche von ihrer Entfernung von der Lichtquelle ab, und zwar

Digitized by Google

nimmt die Erleuchtung in demselben Verhältnisse ab, wie die Quadrate der Entfernungen zunehmen.

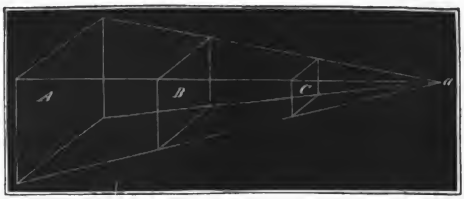


Fig. 35.

Der Einfachheit halber sei die Lichtquelle a (Fig. 35) wieder nur ein leuchtender Punkt, A, B und C seien drei parallele Ebenen von ganz gleicher Beschaffenheit, welche von derselben Strahlenpyramide getroffen werden, ihre respectiven Entfernungen von a verhalten sich wie 3 : 2 : 1. Die Geometrie lehrt nun, daß sich die Größen von A, B und C verhalten, wie $3^2 : 2^2 : 1^2$ oder wie 9 : 4 : 1. Da nun auf alle drei Ebenen gleich viele Strahlen fallen, diese aber bei A zur Erleuchtung einer neunmal größeren, und bei B zur Erleuchtung einer viermal größeren Ebene, als bei C, verwandt werden, so muß offenbar ein C gleicher Theil von A neunmal, und ein C gleicher Theil von B viermal schwächer erleuchtet sein, als C.

§. 174. **Die Beleuchtung abhängig von der Lage gegen die Lichtquelle.** Wenn man Abends einem Blatte Papier verschiedene Lagen gegen die Lichtflamme gibt, ohne die Entfernung von der Flamme dabei wesentlich zu ändern, so bemerkt man, daß das Papier nicht in allen Lagen gleich hell erscheint, und bei näherer Untersuchung findet man, daß es am hellsten erscheint, wenn die auf dasselbe auffallende Strahlenpyramide eine senkrechte ist, daß dagegen die Beleuchtung desto schwächer wird, je kleiner die Winkel werden, unter welchen die einzelnen Lichtstrahlen auf das Papier auffallen. Der Grund hiervon ist leicht einzusehen.

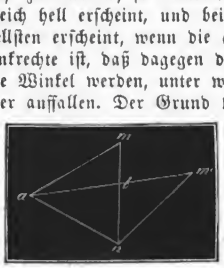


Fig. 36.

Es sei a (Fig. 36.) die Lichtquelle, mn die zu beleuchtende Fläche, so fällt auf sie die Strahlenpyramide man; wird dagegen die Fläche in die Lage m'n gebracht, so fällt jetzt auf dieselbe die Strahlenpyramide m'an, welche in Beziehung auf die Anzahl der Strahlen, durch welche sie gebildet wird, mit der Pyramide ban einerlei ist. Je geringer aber die Anzahl der auf eine Fläche auffallenden Lichtstrahlen ist, desto geringer ist offenbar unter sonst gleichen Umständen die Erleuchtung derselben. Verschiedene Helligkeit zu den verschiedenen Zeiten des Tages; Grund, warum man die Zeichnungen schattirt.

§. 175. **Photometer.** Auf §. 173 gründen sich auch verschiedene Methoden, die Leuchtkräfte zweier Lichtquellen mit einander zu vergleichen. Instrumente, welche zu diesem Zwecke construirt sind, werden Photometer (φῶς, Licht) genannt. Das einfachste derselben ist das s. g. Rumford'sche Photometer. Es besteht aus einer vertical stehenden weißen Fläche, und einige Zoll vor derselben ein etwa ½ Zoll dickes, undurchsichtiges, cylindrisches Stäbchen. Die 2 Lichter, welche mit einander verglichen werden sollen, stellt man so vor dem Stäbchen auf, daß dieses auf die weiße Fläche 2 Schat-

ten wirft. Dann entfernt man das eine oder das andere Licht so lange von dem Stäbchen, bis sich beide Schatten gleich dunkel zeigen. Nun wird die Entfernung jedes Lichtes von der weißen Fläche gemessen, und die erhaltenen Zahlen quadrirt, dann gibt das Verhältniß dieser Quadratzahlen das Verhältniß der Lichtstärken beider Lichter. Es versteht sich von selbst, daß derartige Versuche in einem dunkeln Raume angestellt werden müssen. Der Schatten, welchen das eine Licht wirft, wird hier immer durch das andere Licht erleuchtet, und muß daher desto heller erscheinen, je größer die Leuchtkraft dieses Lichtes ist. Erscheinen demnach die beiden Schatten gleich, so sind sie gleich stark beleuchtet. Der neueste Photometer ist der von Bunsen erfundene. Der Haupttheil dieses Instrumentes ist eine ungleich transparente Fläche, so daß, wenn man nur auf der einen Seite derselben ein Licht aufstellt, die andere ungleich hell erscheinen muß, der transparentere Theil heller, als der übrige. Die beiden zu vergleichenden Lichter werden auf verschiedenen Seiten der Fläche aufgestellt, und das eine dann so lange genähert oder weiter entfernt, bis die ganze Fläche vollkommen gleich erleuchtet scheint, da nur in diesem Falle das von beiden Seiten auf sie fallende Licht gleich intensiv sein kann. Im Uebrigen wird nun verfahren, wie bei dem Rumford'schen Photometer. Gegen beide Instrumente ist anzuführen, daß bei ihnen die Beurtheilung der gleichen Beleuchtung stets nur subjectiv sein kann. Dieser Einwand läßt sich gegen das von Leslie erfundene und von Ritchie verbesserte Photometer nicht erheben. Es beruht auf der freilich nicht erwiesenen Annahme, daß von gleichen Lichtmengen bei ihrer Absorption an gleichen schwarzen Flächen gleich viel Wärme erzeugt werde. Das Instrument besteht im Wesentlichen aus einem Differentialthermometer, dessen Kugeln durch zwei niedrige, aber weite Cylinder von Zinnblech vertreten sind. Die vordere Seite der Cylinder läßt durch ein dünnes und vollkommen durchsichtiges Glas das Licht ein. In der Mitte der Cylinder befinden sich Kreisscheiben von geschwärztem Papier, an welchen das eindringende Licht absorbirt wird. Die beiden zu vergleichenden Lichter werden auf beiden Seiten des Instrumentes den Glasscheiben gegenüber aufgestellt, und dann das eine wieder so lange genähert oder entfernt, bis die Flüssigkeitssäule in beiden Schenkeln des Differentialthermometers gleich hoch steht.

§. 176. **Geschwindigkeit der Fortpflanzung des Lichtes.** Man war früher vergeblich bemüht gewesen, die Geschwindigkeit des Lichtes der des Schalles ähnlich zu bestimmen. Nach den angestellten Versuchen mußte man glauben, die Fortpflanzung des Lichtes erfolge augenblicklich. Die Entfernungen, welche man auf der Erdoberfläche zu solchen Versuchen wählen konnte, waren zu klein, und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes zu groß. Erst im Jahre 1675 gelang es dem dänischen Astronomen Olaf Römer, welcher sich auf der Pariser Sternwarte vielfach mit Beobachtungen des Jupiter und seiner Monde beschäftigte, nachzuweisen, daß das Licht sich nicht augenblicklich fortpflanze, sondern daß es, um einen Weg von ungefähr 42000 deutschen Meilen zu durchlaufen, eine Secunde Zeit gebrauche. Das Resultat wurde auf folgende Weise erhalten. Bei der Größe Jupiters hat sein Schattenkegel eine solche Ausdehnung, daß er über die Bahnen der Monde hinausreicht. Da nun die Bahnen der 4 Monde alle beinahe in dieselbe Ebene fallen, welche fast mit der Ebene der Ekliptik

Digitized by Google

und der Ebene der Jupitersbahn zusammenfällt, so ist ersichtlich, daß die Monde (die äußersten manchmal ausgenommen) bei jedem Umlaufe verfinstert werden. Es gibt uns dies ein Mittel an die Hand, die Umlaufszeiten der Monde zu bestimmen; man darf nämlich nur ermitteln, wie viel Zeit von einem Eintritt eines Mondes in den Schatten des Jupiter bis zum nächsten Eintritt verfließt (für den dem Jupiter nächsten Mond, auf welchen sich die Beobachtungen Römer's hauptsächlich erstreckten, betrug sie ungefähr 42 Stunden). Diese Zeit bleibt sich aber nicht immer vollkommen gleich. Sie nimmt fortwährend ab, wenn sich die Erde in ihrer Bahn dem Jupiter nähert; sie wächst dagegen, wenn sich die Erde von dem Jupiter entfernt. Aus der Verfrühung im einen, und der Verspätung im anderen Falle läßt sich fast mit vollkommener Gewißheit vermuthen, daß beide nur Folge davon seien, daß das Licht in beiden Fällen von dem Jupiter bis zu uns verschieden große Wege zurücklegen muß. Die Astronomie lehrt uns, die Verschiedenheit der Wege berechnen. Die unmittelbaren Beobachtungen gaben die Verschiedenheit der Zeit; man hatte also, um die Geschwindigkeit des Lichtes zu bestimmen, nur die Differenz der Wege durch die Differenz der Zeiten zu dividiren.

Bradley ist im Jahre 1727 durch Beobachtungen der scheinbaren Ortsveränderungen oder Aberration der Gestirne zu demselben Resultat, wie Römer, gelangt, und dadurch hat die von dem Letzteren aufgestellte Ansicht ihre volle Bestätigung gefunden.

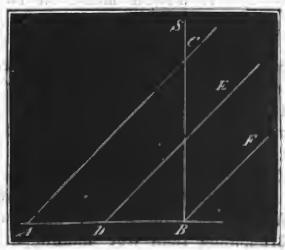


Fig. 37.

Es sei SB (Fig. 37) ein von einem Sterne kommender Lichtstrahl, der in B auf der Erde zu derselben Zeit eintrifft, wenn auch das mit der Erde fortrückende Auge des Beobachters dort ankommt; A sei der Punkt, wo das Auge sich befindet, wenn der Lichtstrahl bei C in das Fernrohr eintritt. Gibt man dem Fernrohr die Richtung AC, so daß es, wenn das Auge in D angekommen, die Richtung DE, und wenn es in B angekommen, die Richtung BF hat, so bleibt der gradlinige Lichtstrahl SCB immer in der Axe des Fernrohrs. Der Winkel FBS mißt die Größe der Abirrung des Lichts. Für Sterne am Pol der Ecliptik, deren Strahlen senkrecht zur Richtung der Erdbewegung sind, fand Bradley diesen Winkel = 20,25 Secunden. Nun ist ∢ FBS = ∢ ACB und AB : BC = tang. 20,25″ : 1. AB ist aber der Weg, welchen die Erde in ihrer Bahn in derselben Zeit zurücklegt, in welcher das Licht von C nach B gelangt. Da bei beiden Bewegungen in gleichen Zeiten gleiche Wege zurückgelegt werden, so bleibt das Verhältniß AB : BC auch ungeändert, wenn man statt derselben die Wege setzt, welche Erde und Licht in einer Secunde zurücklegen. In diesem Falle ist AB = 4,15 geogr. Meilen, und wir erhalten die Proportion 4,15 : x = tang. 20,25″ : 1, woraus x etwas über 42000 geogr. Meilen erhalten wird.

Digitized by Google

Zweites Kapitel.

Aenderung der gradlinigen Richtung bei dem Uebergang aus einem Mittel zu einem anderen durch Reflexion.

§. 177. **Zerſtreutes und regelmäßig reflectirtes Licht.** Schon in §. 166 wurde bemerkt, daß wir die dunkeln Körper nur dadurch ſehen, daß ſie die auf ſie auffallenden Lichtſtrahlen nach unſerem Auge zurückwerfen. Daraus folgt, daß eine gradlinige Fortpflanzung des Lichtes, von welcher wir bisher geſprochen haben, nur ſo lange ſtattfindet, als das Licht ſich in demſelben Mittel bewegt, daß das Licht aber bei ſeinem Uebergang aus einem Mittel in ein anderes eine Aenderung ſeiner Richtung erleidet. Da wir aber die dunkeln Körper im Zuſtande der Beleuchtung von allen Seiten aus ſehen können, ſo müſſen ſie offenbar nach allen Seiten hin Licht zurückwerfen. Wird nun aber die Oberfläche eines dunkeln Körpers polirt, ſo gewahren wir, wenn wir nach derſelben hinſehen, kaum noch die polirte Fläche, aber wohl in gewiſſen Lagen das Bild desjenigen Körpers, von welchem Licht auf ſie fällt. Nach der Erfahrung bemerken wir von der polirten Fläche deſto weniger, je beſſer ſie polirt iſt. Es würde daher eine Fläche, wenn es möglich wäre, ſie abſolut glatt zu machen, von unſeren Augen gar nicht mehr wahrgenommen werden. Aus dieſen Beobachtungen ſchließen wir, daß das von den dunkeln Körpern zurückgeworfene Licht ein zweifaches ſein müſſe. Dasjenige, welches uns es möglich macht, die dunkeln Körper von allen Richtungen aus zu ſehen, nennen wir das unregelmäßig zurückgeworfene oder reflectirte, oder auch das zerſtreute Licht, das andere dagegen, welches uns in polirten Flächen die Bilder der Körper ſehen läßt, welche den polirten Flächen das Licht zuſenden, das regelmäßig reflectirte Licht. Da ſich von beiden Reflexionen nur die regelmäßige auf beſtimmte klare Geſetze zurückführen läßt, ſo wird im Folgenden auch von ihr allein die Rede ſein.

§. 178. **Spiegel.** Jede polirte Fläche, welche zur regelmäßigen Reflexion des Lichtes dient, wird ein Spiegel genannt. Da nun die Fläche eine ebene oder gekrümmte ſein kann, ſo gibt es auch ebene und gekrümmte Spiegel. Die Art der Krümmung kann ſehr mannichfaltig ſein, wir werden uns daher auf diejenigen von der bekannteſten Krümmung beſchränken müſſen, d. h. auf diejenigen Spiegel, deren ſpiegelnde Fläche einen Theil einer Kugeloberfläche bildet, auf die ſphäriſchen Spiegel (σφαῖρα, Kugel). Dieſe werden wieder eingetheilt in Hohl- oder Concavſpiegel (concavus, hohl), wenn die innere, hohle Fläche der Kugeloberfläche ſpiegelt, und erhabene Spiegel oder Converſpiegel (convexus, gewölbt), wenn die äußere Seite der Kugeloberfläche die Spiegelfläche bildet. Der ganze Abſchnitt von der Zurückwerfung oder Reflexion des Lichtes heißt auch die Lehre von den Spiegeln oder Katoptrik (κάτοπτρον, Spiegel). In der Natur vorkommende Spiegel ſind die Oberflächen ruhig ſtehender Flüſſigkeiten, wie z. B. des Waſſers, Queckſilbers, die Oberflächen der Kryſtalle. Als künſtliche Spiegel wendet man am beſten Metallſpiegel an, beſonders von ſolchen Metallen, die wegen ihrer Härte einer vorzüglichen Politur fähig ſind. Sie werfen faſt alles auf ſie auffallende Licht auch zurück. Bei optiſchen Verſuchen bedient man ſich der

Digitized by Google

leichteren Darſtellbarkeit wegen wohl auch polirter Platten von Spiegelglas, welche auf der Rückſeite geſchwärzt ſind, oder nur auf einer Seite polirte Platten von ſchwarzem Glaſe. Sie ſtehen den Metallſpiegeln inſofern nach, als ein bedeutender Theil des auffallenden Lichtes in ſie eindringt, und nur ein kleiner Theil zurückgeworfen wird, weßhalb die von ihnen erzeugten Bilder nur einen geringen Grad von Helligkeit beſitzen. Zu feineren Verſuchen ganz unbrauchbar ſind unſere gewöhnlichen Glasſpiegel, bei welchen die Hinterſeite mit Zinnamalgam belegt iſt. Ein Theil des auffallenden Lichtes wird bei ihnen an der vorderen Glasfläche reflectirt, ein anderer Theil dringt in das Innere ein, und wird dann an der Amalgamafläche zurückgeworfen, weßhalb ſolche Spiegel mehrfache Bilder geben, welche ſich meiſtentheils theilweiſe decken, wodurch natürlich die Deutlichkeit der Bilder beeinträchtigt wird.

§. 179. Geſetze des reflectirten Lichtes. Ein halbkreisförmiger, in Grade eingetheilter Meſſingſtreifen iſt ſenkrecht auf einer ebenen Platte befeſtigt, am äußeren Rande des Meſſingſtreifens laſſen ſich ſenkrecht zur Ebene deſſelben 2 meſſingene Plättchen verſchieben, von welchen jedes in der Mitte eine feine Oeffnung hat. Auf der unteren ebenen Platte iſt ein ganz kleines Spiegelchen ſo angebracht, daß die Mitte des Spiegelchens zugleich der Mittelpunkt des Halbkreiſes iſt, welchen die Oeffnungen in den meſſingenen Plättchen bei ihrer Verſchiebung an dem Meſſingſtreifen beſchreiben. Wenn man durch die eine Oeffnung nach dem Spiegelchen hinſieht, ſo wird man meiſtentheils Nichts in demſelben gewahren; wenn man aber alsdann die Oeffnung am Meſſingſtreifen verſchiebt, ſo wird man eine beſtimmte Lage derſelben finden, in welcher man, durch ſie hindurch nach dem Spiegelchen ſehend, in der Mitte dieſes letzteren das Bild der anderen Oeffnung erblickt. Sieht man in dieſer Lage ſtatt durch die Oeffnung neben dem Plättchen vorbei nach dem Spiegelchen, ſo gewahrt man das Bild der anderen Oeffnung nicht mehr.

Da der Rand der Oeffnung bei Tageslicht ſich in dem Zuſtand der Erleuchtung befindet, ſo wirft er die auf ihn auffallenden Strahlen nach allen Richtungen hin zurück, er wirft alſo auch Strahlen auf den Spiegel, hier werden ſie abermals zurückgeworfen, aber nur nach einer beſtimmten Richtung. Unſer Auge kann deßwegen nur dann das Bild der Oeffnung ſehen, wenn es in dieſer ganz beſtimmten Richtung nach dem Spiegel hinſieht. Wir lernen alſo durch dieſen Verſuch die Richtung des reflectirten Strahles genau kennen, und können ſie auch mit Hilfe des eingetheilten Halbkreiſes jetzt näher beſtimmen. Zuvor aber wollen wir uns mit einigen Definitionen bekannt machen. Denkt man ſich in dem Punkte einer Spiegelfläche, in welchem ein Lichtſtrahl auf dieſelbe auffällt, eine Senkrechte auf den Spiegel errichtet, ſo nennt man dieſe das Einfallsloth, den Winkel, welchen der einfallende Strahl mit dem Einfallslothe bildet, den Einfallswinkel, den Winkel, welchen der reflectirte Strahl mit dem Einfallslothe bildet, den Reflexionswinkel, die durch den Einfallswinkel beſtimmte Ebene die Einfallsebene, und die durch den Reflexionswinkel beſtimmte die Reflexionsebene. Da der Verſuch ergeben hat, daß man nur durch die Oeffnung, und nicht neben dem Plättchen vorbei im Spiegel das Bild der anderen Oeffnung wahrnimmt, ſo folgt daraus das Geſetz: Der einfallende Strahl, der reflec-

Digitized by Google

tirte Strahl und das Einfallsloth liegen in derselben Ebene, oder, mit anderen Worten, die Einfallsebene fällt mit der Reflexionsebene zusammen. Mißt man an dem eingetheilten Halbkreis sowohl den Einfalls-, als auch den Reflexionswinkel, so ergibt sich das fernere Gesetz: Die Einfalls- und Reflexionswinkel liegen auf entgegengesetzten Seiten des Einfallsloth es, und sind stets einander gleich. Aus dem letzten Theile dieses Gesetzes folgt dann noch unmittelbar, daß die Neigungswinkel des einfallenden und des reflectirten Strahles mit dem Spiegel ebenfalls einander gleich sein müssen, sowie daß jeder senkrecht auffallende Strahl in sich selbst zurückgeworfen wird. Einen solchen Strahl, welcher in sich selbst zurückgeworfen wird, nennt man den Hauptstrahl.

§. 180. **Die ebenen Spiegel, Heliostat, Reflexionsgoniometer, Heliotrop.** Befindet sich vor einem ebenen oder Planspiegel ein leuchtender oder beleuchteter Gegenstand, so erblicken wir das Bild desselben eben so weit hinter dem Spiegel, als der Gegenstand vor demselben ist. Das Bild hat die Größe und Stellung des abgebildeten Gegenstandes, und ist gegen die Hinterfläche des Spiegels ebenso geneigt, wie der Gegenstand zu der Vorderfläche, d. h. was bei dem Objecte links liegt, liegt im Bilde rechts und umgekehrt. Um uns die Erklärung zu erleichtern, wollen wir den Gegenstand als ein Aggregat von lauter leuchtenden oder beleuchteten Punkten ansehen, und zunächst nach den gefundenen Gesetzen untersuchen, welche Erscheinung ein solcher Punkt in dem Planspiegel hervorbringen muß.

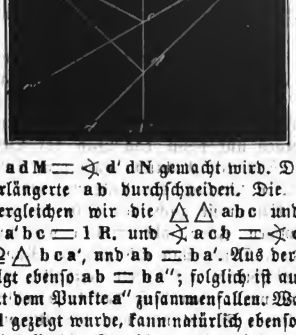


Fig. 38.

MN (Fig. 38) sei der Planspiegel, a ein leuchtender Punkt vor demselben. Von a fallen, wie wir schon wissen, unzählige Lichtstrahlen in Gestalt eines Kegels oder einer Pyramide auf den Spiegel, von diesen sei ab der Hauptstrahl, ac und ad 2 beliebige andere. Nach dem vorhergehenden Paragraphen wird die Richtung c'c und d'd der zurückgeworfenen Strahlen gefunden, wenn $\sphericalangle acM = \sphericalangle c'cN$, und $\sphericalangle adM = \sphericalangle d'dN$ gemacht wird. Die verlängerten c'c und d'd werden die verlängerte ab durchschneiden. Die Durchschnittspunkte seien a' und a''. Vergleichen wir die $\triangle\triangle$ abc und bca', so ist $bc = bc$, $\sphericalangle abc = \sphericalangle a'bc = 1$ R. und $\sphericalangle acb = \sphericalangle c'cd = \sphericalangle bca'$, folglich ist $\triangle abc \cong \triangle bca'$, und $ab = ba'$. Aus der Congruenz der $\triangle\triangle$ abd und bda'' folgt ebenso $ab = ba''$; folglich ist auch $ba' = ba''$, oder der Punkt a' muß mit dem Punkte a'' zusammenfallen. Was hier eben von den 2 Strahlen ac und ad gezeigt wurde, kann natürlich ebenso von allen übrigen von a auf den Spiegel fallenden Strahlen nachgewiesen werden, d. h. alle reflectirten Strahlen scheinen von einem Punkte des Hauptstrahls herzukommen, welcher ebenso weit hinter dem Spiegel liegt, als der leuchtende Punkt vor demselben ist. An diesem Punkte steht daher auch ein Auge, welches von den reflectirten Strahlen getroffen wird, das Bild des leuchtenden Punktes. Haben wir nun statt des leuchtenden Punktes einen leuchtenden Gegenstand, so findet man offenbar das Bild des Gegenstandes, wenn man auf die oben besprochene Weise das Bild jedes der

Digitized by Google

Grenzpunkte desselben bestimmt. Die geometrische Construction wird ein mit der obigen Erfahrung vollkommen übereinstimmendes Resultat liefern.

Nun erklärt sich auch, warum ein horizontaler Gegenstand sich in einem unter 45° zum Horizonte geneigten Spiegel vertical und ein verticaler horizontal abspiegelt; ferner warum, wenn ein Gegenstand auf einem Planspiegel senkrecht steht, sein Bild grade die entgegengesetzte Lage hat, wie z. B. die Gegenstände am Ufer eines Sees; endlich warum man einen Punkt eines Gegenstandes vermittelst eines Planspiegels nur so lange sieht, als die von dem Auge nach dem Bilde des Punktes gezogene grade Linie die Spiegelfläche durchsticht.

Auf die Spiegelungsgesetze der Planspiegel gründen sich auch mehrere wichtige Instrumente, von welchen wir nur den Heliostaten, das Reflexionsgoniometer und den Heliotrop nennen wollen. Der Heliostat (ἥλιος, Sonne und ἵστημι, ich stelle fest, der Sonnenstillsteller) ist seinem Haupttheile nach ein Planspiegel, und hat den Zweck, die auf denselben fallenden Sonnenstrahlen, ungeachtet der fortwährenden Bewegung der Sonne, doch immer genau nach derselben Richtung zu reflectiren. Dieser Zweck wird dadurch erreicht, daß der Spiegel 2 Drehungsaxen erhält. Die Bewegung des Spiegels wird bei den einfacheren Instrumenten mit der Hand geleitet, bei den vollkommneren dagegen durch ein Uhrwerk, welches ihn nach der Sonne dreht. Das Reflexionsgoniometer (Winkelmesser durch Spiegelung) Wollaston's hat den Zweck, die Flächenwinkel kleiner Krystalle zu messen, und ist dadurch dem Mineralogen ein unentbehrliches Instrument. Es beruht auf dem Satze, daß, wenn eine Fläche Licht in einer bestimmten Richtung reflectirt, das von einer anderen Fläche zurückgeworfene Licht nur dann genau dieselbe Richtung haben kann, wenn diese Fläche auch genau in die Lage der ersteren gebracht worden ist. abcd (Fig. 39.) sei z. B. der Durchschnitt eines Krystalls, dessen Flächenwinkel bad gemessen werden soll. Ein in o befindliches Auge wird das Bild von f in der Richtung og erblicken. Wird nun der Krystall um die Kante a gedreht, so wird das Bild von f nur dann durch die spiegelnde Fläche ad in der Richtung og gesehen werden, wenn ad genau die Lage angenommen hat, welche vorher ab hatte; das wird aber der Fall sein, wenn der Krystall um den Winkel ead gedreht worden ist. Das Instrument hat nun die Vorrichtung, daß man die Größe dieser Drehung an einem getheilten Kreise ablesen kann. Da man aber nicht den Winkel ead, sondern den Winkel bad kennen will, so muß man den gefundenen Winkel ead von 180° abziehen.

Fig. 39.

Fig. 40.

Der Heliotrop (ἥλιος, Sonne und τρέπω, ich wende, der Sonnenwender), von Gauß erfunden, dient dazu, um bei großen, ausgedehnten Vermessungen dem Grometer durch Reflexion des Sonnenlichtes ein weit sicht-

bares, und genau einen bestimmten Punkt darbietendes Signal zu verschaffen. Er besteht aus einem Fernrohr, vor welchem 2 auf einander senkrechte Spiegel befestigt sind, von welchen der eine kleiner, als der andere, ist. Beim Gebrauche wird das Fernrohr auf den entfernten Beobachter O (Fig. 40) gerichtet, der das Signal erhalten soll, und darauf werden die Spiegel so gedreht, daß man durch das Fernrohr das Sonnenbild in dem kleineren Spiegel sieht. Der Beobachter O gewahrt es alsdann in dem größeren Spiegel. Wegen der großen Intensität des Sonnenlichts ist das reflectirte Sonnenbild noch in bedeutender Entfernung sichtbar, und erscheint dabei dem Beobachter O grade wegen seiner großen Entfernung doch fast nur als Punkt, so daß es zum genauen Einvisiren besonders geeignet ist.

§. 181. **Parallelspiegel.** Stellt man 2 Planspiegel parallel einander gegenüber, und zwar so, daß ihre spiegelnden Flächen einander zugekehrt sind, und bringt dann zwischen beide ein Object, so wird man sowohl in dem einen, wie in dem anderen Spiegel eine gewisse Anzahl hinter einander befindlicher Bilder des Objects wahrnehmen, gewöhnlich in jedem Spiegel 6 bis 8 Bilder. Ist der Gegenstand genau in der Mitte der beiden Spiegel, so haben auch alle auf einander folgenden Bilder einen gleichen Abstand von einander; anderen Falls werden die Abstände der auf einander folgenden Bilder abwechselnd größer und kleiner. Sind die den spiegelnden Flächen zugekehrten Seiten des Objects verschieden, z. B. an Zeichnung, Farbe u. s. w., so sind die ungraden Bilder in jedem Spiegel immer der dem Spiegel zugewandten Seite des Objects entsprechend, die graden Bilder dagegen der dem anderen Spiegel zugewandten Seite.

Die ganze Erscheinung erklärt sich dadurch, daß das in dem einen Spiegel entstandene Bild für den anderen Spiegel stets wieder Object wird. Nur sollte die Anzahl der Bilder in jedem Spiegel unendlich groß sein, während wir sie in der Wirklichkeit ziemlich beschränkt finden. Der Grund davon liegt darin, daß bei jeder neuen Reflexion der Lichtstrahlen eine Schwächung des Lichtes durch die unregelmäßige Reflexion eintritt, wodurch natürlich die auf einander folgenden Bilder immer lichtschwächer werden müssen, so daß sie gar bald für uns ganz unmerklich werden. Außerdem hängt die Anzahl der Bilder auch von der Intensität des von dem Gegenstande auf den Spiegel fallenden Lichtes ab. Eine Weingeistflamme als Object erzeugt in der Regel weniger Bilder, als die Flamme einer Wachskerze.

§. 182. **Winkelspiegel; Kaleidoscop.** Haben wir 2 Planspiegel, welche einen Flächenwinkel mit einander bilden, und deren spiegelnde Flächen einander zugekehrt sind, und bringen wir einen Gegenstand zwischen beide, so sehen wir mehr als 2 Bilder des Gegenstandes. Ist die Vorrichtung so, daß der Flächenwinkel beider Spiegel verändert werden kann, so wird man bald finden, daß die Anzahl der Bilder von der Größe des Flächenwinkels abhängt, und zwar wächst, wenn dieser kleiner wird. Die wirkliche Anzahl in einem besonderen Fall wird gefunden, wenn man die Anzahl der Grade des Flächenwinkels in 360° dividirt, und von dem Quotienten 1 subtrahirt. Die Bilder sind symmetrisch geordnet, und schon der bloße Augenschein lehrt, daß sie alle von der gemeinschaftlichen Kante der beiden Spiegelflächen mit dem Objecte selbst einen gleichen Abstand haben.

Digitized by Google

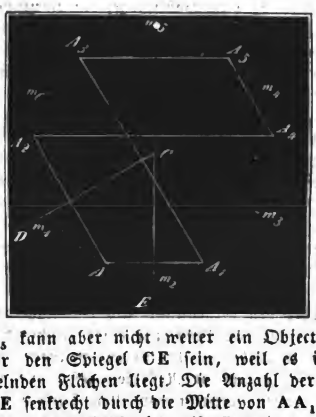


Fig. 41.

Die Erscheinung beruht im Allgemeinen wieder darauf, daß die Bilder des einen Spiegels für den andern Objecte werden. Es seien DC und CE (Fig. 41) die beiden Spiegel, A das zwischen beiden befindliche Object, so entsteht von A hinter dem Spiegel CE das Bild A_1, und hinter dem Spiegel DC das Bild A_2. Nun ist A_1 Object für den Spiegel DC, und erzeugt das Bild A_3; ebenso ist A_2 Object für den Spiegel CE, und erzeugt das Bild A_4. A_3 sowohl, als A_4, als Objecte erzeugen endlich das Bild A_5. A_5 kann aber nicht weiter ein Object weder für den Spiegel CD, noch für den Spiegel CE sein, weil es in beiden Fällen hinter den spiegelnden Flächen liegt. Die Anzahl der Bilder ist daher eine endliche. Da CE senkrecht durch die Mitte von AA_1, und CD senkrecht durch die Mitte von AA_2 geht, so hat also C von A, A_1 und A_2 gleichen Abstand. Ebenso kann es auch von den übrigen Bildern A_3, A_4 und A_5 bewiesen werden. Es läßt sich also durch alle mit C als Mittelpunkt und CA als Halbmesser eine Kreisperipherie ziehen. Man trage den Bogen m_1m_2 so oft, als es geht, auf der Kreisperipherie auf (in unserem Falle noch 5mal), so daß $m_1m_2 = m_2m_3 = m_3m_4$ u. s. w. ist, dann muß $Am_2 = m_2A_1$ sein, und weil $Am_2 < m_1m_2$ ist, auch $m_2A_1 < m_2m_3$ sein, d. h. A_1 muß in den Bogen m_2m_3 fallen. Ebenso muß A_2 in den Bogen m_1m_6 fallen. Sehen wir nun, ob nicht auch das Bild A_3 noch in denselben Bogen fallen kann. Da $m_1A_1 = m_1A_3$ sein muß, und $m_1A_1 > m_1m_2$, also auch $> m_1m_6$ ist, so muß A_3 über den Bogen m_1m_6 hinausfallen, aber jedenfalls in den darauf folgenden Bogen m_6m_5, denn $m_1m_2 + m_2A_1$ ist $= m_1m_6 + m_6A_3$, und da $m_1m_2 = m_1m_6$ war, so ist $m_2A_1 = m_6A_3$; m_2A_1 ist aber $< m_1m_2$, also auch $< m_6m_5$, folglich ist auch $m_6A_3 < m_6m_5$. Auf gleiche Weise wird gezeigt, daß in jeden der Bögen immer nur ein Bild fällt, woraus denn erhellt, daß die Anzahl der Bilder, wie oben angegeben wurde, gefunden werden muß. Wenn 360° kein genaues Vielfaches von den Graden des Flächenwinkels ist, sondern zwischen dem n und n + 1 fachen liegt, so werden entweder n — 1 oder n Bilder gesehen. Befindet sich der Gegenstand ziemlich in der Mitte beider Spiegel, dann sieht man nur n — 1 Bilder; befindet er sich aber dem einen Spiegel viel näher, als dem anderen, so sieht man n Bilder.

Auf der Vervielfältigung der Bilder durch Winkelspiegel beruht das von Brewster erfundene Kaleidoscop (καλος, ειδος, σκοπειν sehen) oder Prachtfeherrohr, welches symmetrische sternförmige oder vieleckige Figuren von der mannichfaltigsten Abwechslung und Färbung zeigt, und deßhalb z. B. in Kattundruckereien zur Erfindung neuer Muster eine Anwendung finden kann.

§. 183. Sphärische Hohlspiegel. Richten wir einen sphärischen Hohlspiegel gegen die Sonne, so sehen wir in einiger Entfernung vor demselben

Digitized by Google

einen hellen Fleck. Befindet sich aber vor dem Hohlspiegel in ziemlicher Entfernung ein anderer Gegenstand, so bemerken wir nahe bei der Stelle, wo eben der helle Fleck beobachtet wurde, doch etwas weiter von dem Spiegel entfernt, ein verkleinertes und verkehrtes Bild des Gegenstandes. Wird der Gegenstand dem Spiegel näher gebracht, so sehen wir das verkehrte Bild desselben sich weiter von dem Spiegel entfernen und an Größe zunehmen. Durch allmähliches Nähern des Gegenstandes wird man an eine Stelle kommen, wo das verkehrte Bild mit dem Gegenstande der Lage nach zusammenfällt, und der Größe nach ihm gleich ist. Bei fernerem Nähern entfernt sich das Bild immer weiter, und nimmt an Größe immer zu, nur ist es noch immer verkehrt. So gelangen wir zu einer Stelle für den Gegenstand, wo gar kein Bild desselben mehr wahrgenommen wird. Bringen wir endlich den Gegenstand dem Spiegel noch näher, dann erblicken wir hinter demselben ein aufrechtes und vergrößertes Bild.

Auch hier wollen wir uns wieder den Gegenstand als ein Aggregat leuchtender Punkte vorstellen, und zunächst das Verhalten eines leuchtenden Punktes zu sphärischen Concavspiegeln nach den bekannten Gesetzen aufsuchen. Um das allgemeine in §. 179 gefundene Reflexionsgesetz auf die gekrümmten Spiegel anwenden zu können, entsteht vor allen Dingen die Frage, wie man für einen beliebigen Punkt einer krummen Fläche das Einfallsloth finden könne. Nun lehrt die Geometrie, daß mit einer krummen Fläche an einem bestimmten Punkte am meisten die sie in diesem Punkte berührende Tangentialebene übereinstimme. Das Einfallsloth für einen gegebenen Punkt einer krummen Fläche wird daher dadurch gefunden, daß man in dem Punkte eine Senkrechte auf die Tangentialebene errichtet. Da wir hier nur von sphärischen Spiegeln reden, so wird die Sache dadurch noch einfacher, daß nach der Geometrie der Kugelhalbmesser, welcher nach dem Berührungspunkte der Tangentialebene gezogen wird, stets auf dieser senkrecht steht, also bei sphärischen Spiegeln mit dem Einfallsloth zusammenfällt. Hieraus folgt, daß jeder Strahl, welcher von einem leuchtenden Punkt durch den Kugelmittelpunkt nach dem Spiegel geht, in sich selbst zurückgeworfen wird, also der Hauptstrahl des leuchtenden Punktes ist. Ehe wir weiter gehen, wird es gut sein, uns noch folgende Definitionen zu merken. Den Kugelmittelpunkt nennt man den geometrischen Mittelpunkt des Spiegels oder den Mittelpunkt der Krümmung, die Mitte der spiegelnden Fläche den optischen Mittelpunkt, die gerade Linie, welche durch beide hindurchgeht, die Axe des Spiegels; wenn von dem geometrischen Mittelpunkt gerade Linien nach zwei entgegengesetzten Punkten des Randes gezogen gedacht werden, so nennt man den Winkel, welcher durch dieselben gebildet wird, die Oeffnung des Spiegels. Bei denjenigen Spiegeln, welche zu optischen Zwecken verwandt werden, darf, wie aus §. 184 erhellen wird, die Oeffnung nur klein sein. Die vor dem Spiegel wahrgenommenen Bilder, welche, wie wir sehen werden, durch das wirkliche Zusammentreffen der von einem Punkte ausgehenden Strahlen erzeugt werden, heißen physische oder Luftbilder, diejenigen aber, welche hinter dem Spiegel liegen, und welche durch die von einem Punkte ausgegangenen und reflectirten Strahlen dadurch erzeugt werden, daß die Verlängerungen aller dieser Strahlen sich in einem und demselben Punkt durchschneiden würden, geometrische

Digitized by Google

Bilder. Denken wir uns einen leuchtenden Punkt in großer Entfernung von dem Spiegel und zwar auf der Axe desselben liegend, so können wir ohne großen Fehler die von demselben auf den Spiegel auffallenden Strahlen alle als parallel mit der Axe ansehen.

Fig. 42.

mn (Fig 42) sei ein solcher auffallender Lichtstrahl. Um nun zu finden, wohin er reflectirt wird, ziehe man von dem geometrischen Mittelpunkt c den Kugelhalbmesser cm, und mache ∢ cmf = ∢ nmc, so gibt mf die Richtung des zurückgeworfenen Strahles an. Da nun ∢ nmc = ∢ mcf, und ∢ nmc auch = ∢ cmf ist, so ist auch ∢ cmf = ∢ mcf, und deßhalb auch mf = fc. Weil aber die Oeffnung des Spiegels AB nur klein ist, und deßwegen der Bogen ma nur wenige Grade umfassen kann, so darf auch ohne merklichen Fehler mf = af angenommen werden. Dann ist auch af = fc und f die Mitte von ac. Alle parallel mit der Axe einfallenden Lichtstrahlen durchschneiden also die Axe in einem Punkt, welcher halb so weit von dem Spiegel entfernt ist, als der geometrische Mittelpunkt. Dadurch entsteht ein mit der Spitze f dem Spiegel zugewandter Lichtkegel, und ein Auge, welches sich innerhalb dieses Lichtkegels befindet, muß demnach in f einen stark erleuchteten Punkt gewahren. Der Punkt f wird, weil durch das Zusammenkommen so vieler Lichtstrahlen in demselben auch eine große Wärmewirkung hervorgerufen wird, der Focus oder Brennpunkt und der Abstand desselben von dem Spiegel die Brennweite des Spiegels genannt. Zu gleicher Zeit geht aus der Betrachtung hervor, daß, wenn der leuchtende Punkt statt in großer Entfernung vom Spiegel sich in f befindet, die von ihm auf den Spiegel fallenden Strahlen nach der Reflexion alle parallel mit der Axe sein müssen, und daß sie daher, da sie sich nirgends durchschneiden, auch kein Bild des leuchtenden Punktes geben können. Ist der leuchtende Punkt in dem geometrischen Mittelpunkt c, so werden alle auf den Spiegel fallenden Strahlen in sich selbst zurückgeworfen, und die reflectirten Strahlen müssen sich demnach alle in c wieder schneiden, weßhalb in diesem Falle das Bild des leuchtenden Punktes mit diesem zusammenfällt. Durch ganz ähnliche geometrische Construction, bei welcher man außer dem in der Richtung der Axe selbst auffallenden Lichtstrahl nur noch einen anderen beliebigen zu berücksichtigen braucht, wird gefunden, daß, wenn sich der leuchtende Punkt dem geometrischen Mittelpunkte nähert, sich auch sein Bild von der entgegengesetzten Seite her diesem Punkte nähert. Wird dann wieder der Ort des Bildes und des leuchtenden Punktes mit einander verwechselt, so sieht man zu gleicher Zeit, daß, wenn sich der leuchtende Punkt zwischen dem Focus und dem geometrischen Mittelpunkt befindet, das Bild außerhalb dieses Mittelpunkts zu liegen kommt, und zwar um so weiter vom Spiegel, je mehr sich der leuchtende Punkt dem Focus nähert. Nun müssen wir auch noch eine geometrische Construction für den Fall machen, daß der leuchtende Punkt zwischen dem Focus und Spiegel liegt. Man wird finden, daß die Strahlen nach der Reflexion divergirend auseinander gehen. Denkt man sich also die reflectirten Strahlen verlängert, so werden sie sich in einem Punkte

Digitized by Google

hinter dem Spiegel schneiden, wo daher auch für uns das Bild des leuchtenden Punktes erscheinen muß. Je näher der leuchtende Punkt dem Spiegel ist, desto stärker müssen die zurückgeworfenen Strahlen divergiren, und desto näher muß also der Punkt, in welchem die Verlängerungen derselben sich durchschneiden, hinter dem Spiegel liegen. Bisher hatten wir den leuchtenden Punkt stets auf der Are angenommen; liegt er aber außerhalb der Are, so müssen sich die Strahlen in dem Hauptstrahle durchschneiden, weil dieser in sich selbst zurückgeworfen wird. Für die verschiedenen Entfernungen des leuchtenden Punktes wird man die verschiedene Lage der Durchschnittspunkte der Strahlen mit dem Hauptstrahl ganz den Durchschnittspunkten mit der Are entsprechend finden. Nun erst wird es uns auch möglich sein, die Lage, Größe und Entfernung der Bilder ganzer Objecte für jeden einzelnen Fall durch Construction zu bestimmen. Man braucht nur nach dem bisher angegebenen Verfahren die Bilder der äußersten Punkte des Objectes zu suchen, da offenbar die Bilder der übrigen Punkte zwischen diesen liegen müssen. Die Construction liefert mit den zu Anfang dieses Paragraphen angeführten Erfahrungen vollkommen übereinstimmende Resultate. Ohne sie noch einmal zu wiederholen, wollen wir hier nur die Lage der Bilder etwas näher bestimmen: 1) Solange der Gegenstand weiter von dem Spiegel entfernt ist, als der geometrische Mittelpunkt, liegt das Bild zwischen diesem und dem Focus; 2) im geometrischen Mittelpunkt fällt Bild und Gegenstand zusammen; 3) ist der Gegenstand zwischen dem geometrischen Mittelpunkt und dem Focus, so ist das Bild weiter, als der Halbmesser von dem Spiegel entfernt; 4) ist der Gegenstand im Focus, so entsteht gar kein Bild; 5) ist er aber zwischen Focus und Spiegel, so ist das Bild hinter dem Spiegel. *) Anwendung der Hohlspiegel als Brennspiegel, als Beleuchtungsapparat (Reverberen) bei Lampen und Mikroscopen; Spiegeltelescope.

§. 184. Abweichung wegen der Kugelgestalt bei sphärischen Spiegeln. Wenn die Strahlen einer Lichtflamme in ein cylinderförmiges, inwendig glattes, nicht sehr enges Gefäß fallen, so erblickt man auf dem

*) Die Lage des Bildes in all den verschiedenen Fällen läßt sich auch aus einer einzigen Formel berechnen, welche hier entwickelt werden soll, weil zum Verständniß nur ganz elementare Sätze erfordert werden.

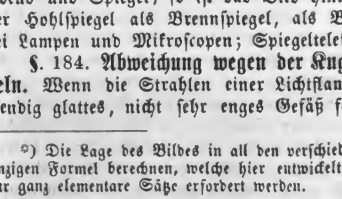
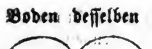


Fig. 43.

A (Fig. 43) sei ein leuchtender Punkt, also AM = a seine Entfernung vom Spiegel, AB sei der auffallende, BF der reflectirte Strahl, also FM = α die Entfernung des Bildes von dem Spiegel, CB = CM = r sei der Kugelradius, die Brennweite oder ½r sei = p. Da ∢ ABC = ∢ CBF, so ist AB : BF = AC : CF, und weil die Oeffnung des Spiegels nur klein ist, so kann ohne merklichen Fehler AM und MF statt AB und BF gesetzt werden, dann ist AM : MF = AC : CF, oder a : α = a − r : r − α = a − 2p : 2p − α, 2ap − aα = αa − 2αp, ap = aα − αp. Wird diese Gleichung durch apα dividirt, dann ist $\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{p} - \frac{1}{a}$, d. h. der umgekehrte Werth der Entfernung des **Bildes vom Spiegel ist gleich dem Unterschiede aus den umgekehrten Werthen der Brennweite und der Entfernung des leuchtenden Punktes vom Spiegel.**

Digitized by Google

Boden desſelben eine helle, herzförmige Linie, etwa in folgender Geſtalt  Die innere Wand, auf welche die Strahlen auffallen, bildet einen ſphäriſchen Hohlſpiegel von nicht unbedeutender Oeffnung. Nun haben wir in dem vorhergehenden Paragraph geſehen, daß nur dann mf (Fig. 42) = af geſetzt werden darf, wenn der Bogen ma ſehr klein iſt. Je weiter von der Are ab entfernt ein Strahl den Spiegel trifft, deſto mehr nach a hin wird er die Are durchſchneiden, damit ſchneidet er aber auch den reflectirten Theil des der Are näheren Strahles ſchon früher, als in f. Conſtruirt man nun die Durchſchnittspunkte je zweier benachbarten, in einerlei Ebene reflectirten Strahlen, und verbindet alle dieſe Punkte durch eine Linie, ſo entſteht eine krumme Linie von obiger Geſtalt, welche man Brennlinie oder katakauſtiſche Linie (κατακαιω ich verbrenne) nennt. Alle durch einen ſphäriſchen Hohlſpiegel erzeugten Brennlinien bilden zuſammen genommen eine krumme Fläche, die kauſtiſche Fläche. Die Linie, welche wir in unſerem Verſuche wahrnehmen, iſt dann die Durchſchnittslinie der Brennfläche mit der Bodenfläche des Gefäßes. Der Umſtand, daß bei ſphäriſchen Spiegeln die von einem leuchtenden Punkte ausgehenden Strahlen ſich nicht alle in demſelben Punkte durchſchneiden, beeinträchtigt natürlich die Deutlichkeit der Bilder, und iſt um ſo nachtheiliger, in je mehr Punkten die Strahlen ſich durchſchneiden, d. h. je größer die Oeffnung des Spiegels iſt. Man nennt den hierdurch bedingten Fehler, welcher die Erzeugung ganz ſcharfer, deutlicher Bilder verhindert, die Abweichung wegen der Kugelgeſtalt oder die ſphäriſche Aberration, weil er in der Kugelkrümmung begründet iſt, und bei einem paraboliſchen oder elliptiſchen Spiegel z. B. nicht vorkommt. Wenn man deſſenungeachtet in der Regel ſphäriſche, und keine paraboliſchen oder elliptiſchen Spiegel in Anwendung bringt, ſo kommt dies daher, daß die Anfertigung der letzteren großen Schwierigkeiten unterliegt.

§. 185. **Sphäriſche Converſpiegel.** Betrachten wir einen Gegenſtand in einem Converſpiegel, ſo ſehen wir unter allen Umſtänden hinter demſelben ein verkleinertes, aber aufrechtes Bild des Gegenſtandes. Der einzige Unterſchied iſt der, daß je nach der größeren Entfernung des Gegenſtandes von dem Spiegel auch das Bild deſſelben weiter von dem Spiegel abrückt, und kleiner wird.

Um durch geometriſche Conſtruction die Erſcheinung zu erklären, können wir wieder ganz genau denſelben Weg verfolgen, wie bei den Hohlſpiegeln. Wir wollen indeß hier nur den Fall conſtruiren, daß der Gegenſtand in ſehr großer Entfernung von dem Spiegel ſich befindet, ſo daß bei gehöriger Stellung des Spiegels zu dem Gegenſtande die auf den Spiegel fallenden Strahlen als parallel mit der Are deſſelben angeſehen werden können.

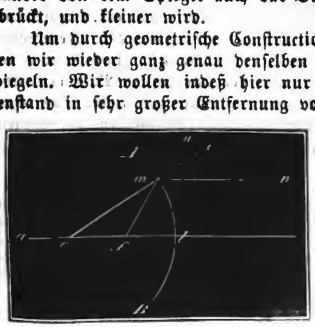


Fig. 44.

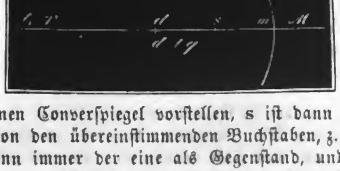
Es ſei AB (Fig. 44) der Converſpiegel, c ſein geometriſcher Mittelpunkt, ab ſeine Are, und mn ein beliebiger parallel mit ab auf den Spiegel fallender Strahl. Man ziehe

Digitized by Google

von e durch m das Einfallsloth cc' und mache ∢ n'mc' = ∢ c'mn, so ist mn die Richtung des reflectirten Strahles. Alle parallel mit der Axe auffallenden Strahlen werden also nach der Reflexion divergiren. Der Eindruck, welchen ein vor dem Spiegel sich befindendes Auge erhält, kann demnach nur von einem Punkte ausgehen, in welchem ihre gedachten Verlängerungen sich durchschneiden. Für die nahe bei der Axe auffallenden Strahlen wird dieser Punkt der Punkt f sein, wie sogleich aus der näheren Bestimmung seiner Lage erhellen wird. Es ist nämlich ∢ n'mc' = ∢ c'mn = ∢ mcf, es ist aber auch ∢ n'mc' = ∢ cmf, also ist ∢ mcf = ∢ cmf und cf = fm. Für die nahe bei ab auffallenden Strahlen ist der Bogen mb sehr klein, und es kann fm = fb gesetzt werden. Dann ist cf = fb, und f liegt in der Mitte des Radius cb. Alle parallel mit der Axe in deren Nähe auf den Spiegel fallenden Strahlen scheinen also nach der Reflexion von einem Punkte hinter dem Spiegel zu kommen, welcher um den halben Kugelhalbmesser von dem Spiegel entfernt ist. Diesen Punkt nennt man auch hier den Brennpunkt (jedoch nicht aus demselben Grunde, wie bei den Hohlspiegeln, sondern nur um eine gleichförmige Bezeichnung zu erzielen) und seine Entfernung von dem Spiegel die Brennweite. Auch die Convexspiegel leiden aus denselben Gründen, wie die Hohlspiegel, an der sphärischen Aberration. Die Construction der übrigen Fälle wird dem Privatfleiß überlassen. Als Resultat wird man finden, daß alle Bilder zwischen dem Focus und dem Spiegel liegen müssen *). Da parallele Strahlen durch Hohlspiegel convergent, durch Convexspiegel dagegen divergent gemacht werden, so nennt man erstere auch Sammelspiegel, letztere Zerstreuungsspiegel.

Wir erwähnen hier noch ein in Grunert's Archiv 12ter Theil 4tes Heft von Professor Grebe mitgetheiltes Hilfsmittel, die verschiedenen bei sphärischen Spiegeln vorkommenden Fälle zu behalten. Die Buchstaben in Fig. 45. sind die Anfangsbuchstaben der auf einander folgenden Wörter in dem Hexameter: Quin, Tite, disce, decet te, quae sint mira Minervae. Der aus dem Mittelpunkt d d beschriebene Bogen kann sowohl einen Hohl-, als einen Convexspiegel vorstellen, s ist dann für beide Fälle der Brennpunkt. Von den übereinstimmenden Buchstaben, z. B. Q und q, M und m u. s. w., kann immer der eine als Gegenstand, und der andere als Bild betrachtet werden. Ist der große Buchstaben Gegenstand, und der kleine das Bild, so ist das Bild verkleinert; ist dagegen der kleine Buchstaben der Gegenstand, und der große das Bild, so ist das Bild vergrößert. Da die beiden

Fig. 45.



*) Die in der Anmerkung zu §. 183 hergeleitete katoptrische Formel zur Berechnung der Entfernung des Bildes von dem Spiegel läßt sich auch auf die Convexspiegel anwenden; nur muß, weil jetzt der Brennpunkt und der Gegenstand auf entgegengesetzten Seiten des Spiegels liegen, die Brennweite p negativ genommen werden, wenn a oder die Entfernung des Gegenstandes von dem Spiegel positiv gesetzt wird. Sie heißt also jetzt $\frac{1}{\alpha} = -\frac{1}{p} - \frac{1}{a} = -\left(\frac{1}{p} + \frac{1}{a}\right)$.

Digitized by Google

d klein sind, so ist Bild und Gegenstand gleich groß, und da a nur einmal vorkommt, so hat es kein Bild. Steht der entsprechende Buchstabe auf der anderen Seite der Axe, so deutet dieses an, daß das Bild verkehrt ist; wenn nicht, so hat es dieselbe Stellung, wie der Gegenstand. Wird M als Gegenstand betrachtet, so muß der Spiegel convex gedacht werden, in allen übrigen Fällen concav.

§. 186. **Cylindrische und conische Spiegel.** Wenn man einen Gegenstand in einem cylindrischen oder conischen Spiegel betrachtet, so erblickt man ein sehr verzerrtes Bild desselben.

Cylindrische Spiegel wirken nämlich in der mit der Axe des Cylinders parallelen Richtung der Spiegelfläche als Planspiegel, und deßwegen haben die Bilder nach dieser Richtung ihre natürliche Länge. In der darauf senkrechten Richtung dagegen wirken sie als sphärische Spiegel, als Concavspiegel, wenn die hohle Seitenfläche des Cylinders, als Convexspiegel, wenn die erhabene Seitenfläche polirt ist. Die Bilder werden also in dieser Richtung je nach Umständen bald vergrößert, bald verkleinert erscheinen. Conische Spiegel wirken wieder in der gradlinigen Richtung von der Spitze nach dem Umfange der Grundfläche als Planspiegel, in der darauf senkrechten Richtung dagegen als sphärische Spiegel, und zwar wird die Krümmung derselben von Unten nach der Spitze zu immer stärker. Sie werden also den cylindrischen Spiegeln ganz ähnliche, nur noch verzerrtere Bilder geben. Es ergibt sich auch aus dem Gesagten, daß, wenn man von Gegenständen nach bestimmten Gesetzen verzerrte Zeichnungen anfertigt, und diese als Objecte solcher Spiegel benutzt, die Spiegelbilder der Gegenstände in ihren natürlichen Verhältnissen erscheinen. Solche Zeichnungen führen den Namen katoptrische Anamorphosen (ἀναμόρφωσις, Umbildung).

Drittes Kapitel.

Aenderung der gradlinigen Richtung bei dem Uebergange aus einem Mittel in ein anderes durch Brechung.

§. 187. **Experimenteller Nachweis der Brechung.** 1) Legt man ein Geldstück in ein Gefäß mit undurchsichtigen Wänden, tritt dann von demselben so weit zurück, daß das Geldstück eben nicht mehr gesehen wird, und läßt dann Wasser in das Gefäß gießen, so erblickt man bei einer gewissen Höhe desselben das Geldstück wieder; es scheint, als wenn das Geldstück mit dem ganzen Boden zugleich gehoben worden wäre. 2) Ein grader Stab, senkrecht zum Theil in's Wasser getaucht, erscheint grade, aber verkürzt; schief eingetaucht, erscheint er gebrochen, indem der in das Wasser getauchte Theil höher zu liegen scheint, als er sich wirklich befindet. 3) Klare Gewässer, bei welchen man bis auf den Grund derselben sehen kann, scheinen weniger tief, als sie in der Wirklichkeit sind. 4) Zieht man auf einem Blatt Papier eine grade Linie, bedeckt den mittleren Theil derselben mit einem etwas dicken Glasstück mit parallelen Flächen, so daß jedoch auf beiden Seiten die Enden der graden Linie noch unbedeckt bleiben, und steht dann in geneigter Richtung nach der graden Linie hin, so scheint das von dem Glase bedeckte Stück der graden Linie von den beiden nicht bedeckten Stücken abgebrochen und weiter fortgeschoben. Hält man aber das Auge

Digitized by Google

senkrecht über die grade Linie, so sehen wir dieselbe ununterbrochen. 5) Hat man 2 senkrecht auf einander stehende Brettchen, die jedoch so eingerichtet sind, daß, wenn man das Glasstück des vorigen Versuchs in den von ihnen gebildeten Flächenwinkel hineinlegt, beide Brettchen noch über das Glas hervorragen, läßt man das Licht einer Kerzenflamme über die aufrecht stehende Wand fallen, und bemerkt auf der Grundfläche, bis wohin der Schatten derselben reicht, und legt hierauf das Glasstück in den Flächenwinkel; so wird man finden, daß der Schatten verkürzt worden ist.

Sobald wir uns bei dem ersten Versuche soweit von dem Gefäße entfernt haben, daß wir das Geldstück nicht mehr sehen können, läßt sich von unserem Auge nach dem Geldstück auch keine grade Linie mehr ziehen, und deßwegen kann kein Lichtstrahl mehr von demselben in das Auge gelangen. Da nun das Geldstück, ohne daß es seinen Ort verändert hat, wieder sichtbar wird, wenn Wasser in das Gefäß gegossen ist, es aber nur sichtbar sein kann, wenn von ihm ausgehende Lichtstrahlen in unser Auge gelangen, so können sich diese nicht in einer graden Linie bewegt haben. Lichtstrahlen bewegen sich, wie wir oben gesehen haben, so lange sie in demselben Mittel bleiben, in derselben graden Linie, die Ablenkung von der ursprünglichen Richtung kann also weder im Wasser, noch während der Bewegung in der Luft stattgefunden haben, sie kann also nur beim Uebergang aus dem einen Mittel in das andere an der Trennungsfläche derselben erfolgt sein. Der Theil eines Lichtstrahls im Wasser muß mit seiner Fortsetzung in der Luft demnach einen Winkel bilden. Wir sehen den Gegenstand aber nicht an seinem wahren Orte, weil wir ihn nur in derjenigen Richtung sehen können, in welcher der Lichtstrahl in unser Auge gelangt. Aehnlich lassen sich alle die anderen angeführten Versuche erklären, und wir lernen also aus denselben, daß das Licht bei seinem Uebergange aus einem durchsichtigen Medium in ein anderes von seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt wird, und in dem zweiten Medium eine neue Richtung annimmt, eine Erscheinung, welche man mit dem Namen Brechung des Lichts belegt hat. Aus dem ersten Theil des zweiten, und dem letzten Theil des vierten Versuchs geht aber auch noch hervor, daß diese Brechung nicht unter allen Umständen stattfindet, daß sie für die die Trennungsfläche beider Mittel senkrecht treffenden Lichtstrahlen nicht eintritt. Daß ein Theil des auf die Trennungsfläche fallenden Lichtes in das erste Mittel zurückgeworfen wird, also gar nicht in das zweite gelangt, haben wir bereits kennen gelernt. Wir wollen uns nun in den folgenden Paragraphen mit den Erscheinungen der Brechung des Lichtes näher bekannt machen, und bemerken hier noch, daß die Worte Einfallsloth, Einfallswinkel und Einfallsebene in demselben Sinne, wie bisher, werden gebraucht werden, daß man ferner unter dem Brechungswinkel den von dem gebrochenen Strahle und dem Einfallsloth gebildeten Winkel, und unter der Brechungsebene die durch die beiden Schenkel desselben bestimmte Ebene versteht. Die ganze Lehre von der Brechung oder Refraction (refringĕre, brechen) des Lichtes führt den Namen Dioptrik (διοπτρον, ein Instrument, um Etwas dadurch zu sehen).

§. 188. **Gesetze der Brechung; astronomische und terrestrische Strahlenbrechung.** Man nehme einen in Grade eingetheilten festen Kreis, um dessen Mittelpunkt und in dessen Ebene sich 2 Lineale drehen lassen, die

Digitized by Google

in zwei zur Kreisebene senkrechten, kleinen, ebenen Flächen über den Rand des eingetheilten Kreises hervorragen. In der Mitte der einen dieser kleinen Ebenen befestige man ein ganz kleines, hellglänzendes Körperchen, etwa ein Klümpchen Silber, in der Mitte der anderen bringe man eine feine Oeffnung an. Eine andere feine Oeffnung befindet sich in einer kleinen Ebene, welche sich um eine in dem Mittelpunkte des Kreises senkrechte Axe stets parallel der letztern Ebene dreht. Die beiden feinen Oeffnungen und das Klümpchen Silber müssen in derselben Ebene liegen. Diesen Kreis bringe man in verticaler Lage in ein Gefäß mit Wasser, so daß der Mittelpunkt des Kreises und der Nullpunkt der Theilung eben die Oberfläche des Wassers berühren, und daß das Lineal mit dem Silberklümpchen sich auf einem beliebigen Theilstrich unter Wasser befinden. Nun verrücke man das andere Lineal so lange am Rande des Kreises, bis man durch die beiden feinen Oeffnungen das Silberklümpchen erblickt, so gibt offenbar die grade Linie zwischen beiden Oeffnungen die Richtung des Lichtstrahls in der Luft, und die grade Linie zwischen der mittleren Oeffnung und dem Silber die Richtung des Lichtstrahls im Wasser an. An dem eingetheilten Kreise kann man nun die Größe des Einfalls- und des Brechungswinkels ablesen. Dadurch daß man nach einander das Silber an andere Theilstriche bringt, und dann den Versuch erneuert, kann man die verschiedenen zu einander gehörigen Einfalls- und Brechungswinkel finden. Sieht man bei der richtigen Stellung beider Lineale neben der oberen Oeffnung vorbei durch die andere nach dem Silber, so wird man dasselbe nicht mehr erblicken.

Da durch diesen Apparat immer nur Einer beobachten kann, so ist der in neuerer Zeit von Müller angegebene Apparat, bei welchem alle Umstehenden zu gleicher Zeit die Erscheinungen wahrnehmen können, sehr zu empfehlen. Er besteht aus einem 2 bis 3 Zoll hohen Gefäß, welches auf der einen Seite durch eine ebene Glasfläche, sonst aber durch eine halbkreisförmige verticale Wand begrenzt ist. Die Glasfläche ist bis auf eine in ihrer Mitte befindliche Spalte von etwa ½ Linie Breite undurchsichtig gemacht. Die halbkreisförmige Rückwand ist im Innern mit einer Gradtheilung versehen, deren Nullpunkt der Spalte grade gegenüber liegt. Das Gefäß wird zum Theil mit Wasser gefüllt. Bringt man nun ein Kerzenlicht in einiger Entfernung grade vor den Spalt, so werden die durch denselben einfallenden Lichtstrahlen grade den Nullpunkt der Theilung treffen. Bringt man aber das Licht auf die Seite, so werden die eindringenden Lichtstrahlen im oberen und unteren Theile nicht an derselben Stelle die Rückwand treffen; oben hat sich der Lichtstrahl durch die Luft, unten durch das Wasser bewegt. Die Gradeintheilung gibt dann die den beiden Richtungen entsprechenden Winkel.

Aus der Vergleichung der Resultate einer Anzahl solcher Versuche ergeben sich nun folgende Fundamentalgesetze für die Brechung des Lichtes: 1) Die Einfallsebene und die Brechungsebene fallen zusammen; 2) der einfallende und der gebrochene Strahl liegen auf entgegengesetzten Seiten des Einfallslothes; 3) der Sinus des Einfallswinkels steht für dieselben 2 durchsichtigen Mittel zu dem Sinus des Brechungswinkels stets in demselben Verhältniß, welches auch die Neigung des einfallenden Strahles

zum Einfallslothe sein mag. Dieses Verhältniß nennt man das Brechungsverhältniß, und den Quotienten, welchen man erhält, wenn man den Sinus des Einfallswinkels durch den Sinus des Brechungswinkels dividirt, den Brechungsexponent oder Brechungsinder. Die Versuche lehren, daß für den Uebergang des Lichts aus der Luft in Wasser der Brechungsexponent $= \frac{4}{3}$, für den Uebergang aus Luft in Glas $= \frac{3}{2}$, also aus Wasser in Luft $= \frac{3}{4}$ und aus Glas in Luft $= \frac{2}{3}$ ist. Aus dem angeführten dritten Gesetz ergibt sich nun auch, warum die senkrecht auf die Trennungsfläche zweier Mittel fallenden Strahlen nicht gebrochen werden. Bei ihnen ist nämlich der Einfallswinkel $= 0°$, also auch der Sinus des Einfallswinkels $= 0$, der Sinus des Brechungswinkels würde gefunden, wenn man 0 mit dem umgekehrten Werthe des Brechungsexponenten multiplicirte, ein Product aber, dessen einer Factor $= 0$ ist, ist $= 0$; ist aber der Sinus des Brechungswinkels $= 0$, dann ist auch der Brechungswinkel selbst $= 0°$.

Ist für 2 Medien der Brechungswinkel kleiner, als der Einfallswinkel, so sagt man, das Licht werde zum Einfallslothe gebrochen, im entgegengesetzten Fall von dem Einfallslothe weg. Im ersteren Fall ist offenbar der Brechungsexponent > 1, im letzteren < 1. Die Erfahrung lehrt, daß bei dem Uebergang des Lichtes in ein dichteres Mittel die Brechung meistens zu dem Einfallslothe erfolge, doch läßt sich dies nicht als eine allgemein gültige Regel aufstellen, wie dies früher wohl geschehen ist. Sehr stark brechen das Licht alle brennbaren Körper, weßhalb schon Newton aus der starken lichtbrechenden Kraft des Diamanten die Brennbarkeit desselben vermuthete.

Die obigen Gesetze der Brechung wurden zuerst von dem Leydner Professor Willibrod Snell (1620) aufgefunden, aber erst mehrere Jahre später von Descartes veröffentlicht.

Nun wird es auch möglich, uns die Erscheinungen der Strahlenbrechung, sowohl der astronomischen, wie auch der irdischen oder terrestrischen zu verdeutlichen. Das beiden Gemeinsame ist, daß wir ferne Gegenstände höher über dem Horizonte gewahr werden, als sie in der Wirklichkeit sich befinden. Wird die Erscheinung auf Himmelskörper bezogen, so spricht man von einer astronomischen Strahlenbrechung, dagegen bei Gegenständen auf der Erdoberfläche selbst von einer terrestrischen Strahlenbrechung. Ihre Erklärung finden beide darin, daß das von fernen Gegenständen ausgehende Licht nicht in einer graden Linie in unser Auge gelangen kann, weil die Luft von Oben nach Unten stets an Dichtigkeit zunimmt. Da hierdurch das Licht fortwährend von seiner Bahn abgelenkt und zwar fortwährend zum Einfallsloth gebrochen wird, so beschreibt es also eine krumme Linie, deren convere Seite nach Oben gekehrt ist, und da wir einen leuchtenden Punkt immer in die Richtung versetzen, in welcher das von ihm ausgehende Licht in unser Auge gelangt, so sehen wir ihn nach der Tangente des Endes dieser Curve, also höher, als er wirklich ist. Die Abweichung von der ursprünglichen Bahn wird natürlich desto bedeutender, je größer der Weg ist, welchen die von dem fernen Gegenstande ausgehenden Lichtstrahlen bis zu unserem Auge durch die Atmosphäre zurückzulegen haben. Die astronomische Strahlenbrechung muß also für Gestirne in der Nähe des Horizontes bedeutender sein, als für höher stehende. Die astronomische Strahlenbrechung ist für Sterne, welche

Digitized by Google

gleich hoch über dem Horizonte stehen, sie mögen von der Erde eine noch so verschiedene Entfernung haben, vollkommen gleich, weil die von ihnen ausgehenden Lichtstrahlen durch die Atmosphäre bis zu unserem Auge einen gleichen Weg zurückzulegen haben. Anders dagegen ist es bei der terrestrischen Strahlenbrechung; diese muß natürlich für entferntere Gegenstände größer sein, als für nähere. Nur die in dem Zenith befindlichen Sterne werden von uns in ihrer wahren Richtung wahrgenommen, weil die von ihnen ausgehenden Strahlen senkrecht, also ungebrochen, durch die verschiedenen Schichten der Luft hindurch gehen. Daß demnach bei genauen Höhenbestimmungen auf die Strahlenbrechung Rücksicht genommen werden muß, ist einleuchtend. Bei dieser Rücksichtnahme darf auch nicht außer Acht gelassen werden, daß die Refraction der Atmosphäre nicht zu allen Zeiten dieselbe ist, da ja die Dichtigkeit der Atmosphäre sich auch nicht immer gleich bleibt. Auf diese haben nämlich der veränderliche Druck der darüber befindlichen Luft, die Temperatur und der Feuchtigkeitsgehalt Einfluß. Es muß also bei ganz genauen Bestimmungen auch der jedesmalige Stand des Barometers, Thermometers, und Hygrometers berücksichtigt werden.

Durch astronomische Strahlenbrechung sehen wir die Sonne schon vor ihrem wirklichen Aufgange, und noch nach ihrem wirklichen Untergange, wodurch die Dauer des Tages vergrößert wird. Auch erklären wir uns aus derselben die eingedrückte Gestalt der Sonne und des Mondes bei ihrem Auf- und Untergange, indem der untere Rand derselben mehr gehoben wird, als der obere. Aus der terrestrischen Strahlenbrechung erklären wir uns, daß bisweilen an einem Orte unter dem Horizonte desselben liegende entfernte Gegenstände sichtbar werden, da die Strahlenbrechung ja, wie eben bemerkt wurde, zu einer Zeit größer ist, als zu einer anderen. So wurde schon mehrere Male an der englischen Küste die gegenüberliegende französische Küste wahrgenommen. Ganz ähnlich dürfte es sich wohl auch mit den Erscheinungen der s. g. Fata Morgana (Schlösser der Fee Morgana) verhalten.

§. 189. **Totale Reflexion; camera lucida.** 1) Stellt man in dem in dem vorigen Paragraphen beschriebenen Versuche das Lineal mit dem Silberklümpchen auf einen solchen Theilstrich ein, daß der Winkel, welchen es mit der Senkrechten bildet, größer ist, als $48\frac{1}{4}°$, so ist man bei keiner Lage des anderen Lineals im Stande, das Silber durch die feine Oeffnung wahrzunehmen. 2) Taucht man in ein mit Wasser gefülltes Glas ein leeres Reagenzgläschen in ziemlich schiefer Richtung ein, und betrachtet dieses von Oben, so scheint es mit Quecksilber gefüllt zu sein. Gießt man hierauf etwas Wasser in das Reagenzgläschen, so zeigt es den früheren Glanz nur noch bis dahin, wohin das Wasser in dem Gläschen reicht.

Der Sinus des Brechungswinkels muß für den Uebergang des Lichtes aus Wasser in Luft immer $\frac{4}{3}$ mal größer sein, als der Sinus des Einfallswinkels, kann aber, weil der größte Brechungswinkel nur 90° sein kann, nicht größer als 1 sein. Diesen Werth erreicht er bei Wasser und Luft beinahe, wenn der Einfallswinkel $= 48\frac{1}{4}°$ ist; denn dann ist der Sinus des Einfallswinkels $= 0{,}7489557$ und $0{,}7489557 \times \frac{4}{3}$ ist $= 0{,}9986076$. Sobald der Einfallswinkel noch größer wird, müßte also der Brechungs-

Digitized by Google

winkel $> 90°$ sein, was nicht möglich ist. Das Licht kann also in diesem Falle nicht mehr gebrochen werden, es kann gar nicht in die Luft übertreten. Dies ist der Grund, warum jetzt das Silber durch die feine Oeffnung nicht mehr gesehen werden kann. Da das Licht aber auf die Trennungsfläche zweier verschiedenen Medien gefallen ist, so bleibt Nichts übrig, als daß es, und zwar vollständig, nach den Gesetzen der Reflexion in das Wasser zurückgeworfen wird. Weil hier nicht nur ein Theil des Lichtes, wie bei der gewöhnlichen Reflexion, sondern sämmtliches auffallende Licht zurückgeworfen wird, so heißt dieser Vorgang die totale Reflexion. Nun können wir uns auch den unter 2 aufgeführten Versuch erklären. Durch die Seitenwand des größeren Glases fallen auf das Reagenzglas die Strahlen so schräg auf, daß sie nicht in die in dem Reagenzglas befindliche Luft eindringen können, und deßwegen in das Wasser nach Oben reflectirt werden. Der starke Glanz rührt eben davon her, daß sämmtliches auffallende Licht reflectirt wird. Ist aber der untere Theil des Reagenzgläschens mit Wasser gefüllt, so können die Strahlen, welche auf diesen Theil fallen, in das in dem Gläschen befindliche Wasser eindringen.

Aus dem Mitgetheilten geht zugleich hervor, daß die Erscheinung der totalen Reflexion nur eintreten kann, wenn der Lichtstrahl von dem Einfallsloth gebrochen wird, d. h. beim Uebergang aus einem stärker brechenden Mittel in ein schwächer brechendes. Auch braucht nicht erst erwähnt zu werden, daß der Werth des Grenzwinkels, von welchem an die totale Reflexion eintreten kann, sich für verschiedene Mittel nach ihrem Brechungsinder richtet.

Auf der totalen Reflexion beruht auch die von Wollaston im Jahre 1809 erfundene camera lucida (helle Kammer, so genannt nicht wegen ihrer Einrichtung, sondern wegen ihres mit der in §. 195 beschriebenen camera obscura gleichen Zweckes), welche dazu dient, um die Umrisse von Gegenständen abzuzeichnen. Der Hauptbestandtheil ist ein vierseitiges Glasprisma abcd (Fig. 46), welches bei b einen rechten, und bei d einen stumpfen Winkel von 135° hat. Der von einem Gegenstand kommende Lichtstrahl mn, welcher senkrecht auf bc trifft, wird bei seinem Eintritt in das Prisma nicht gebrochen, fällt aber so schief auf dc, daß er bei n nicht wieder in die Luft austreten kann, sondern nach no reflectirt wird. Hier fällt er abermals so schief auf, daß er auch bei o nicht in die Luft austritt, sondern nach Oben reflectirt wird. Da er aber jetzt ab in senkrechter Richtung trifft, so tritt er ungebrochen in der Richtung op aus. Befindet sich daher in p ein Auge, so muß dieses in der Richtung po ein Bild des Punktes sehen, von welchem der Lichtstrahl mnop herkam. Beim Gebrauche ist gewöhnlich die horizontale Fläche ab mit einer undurchsichtigen Platte bedeckt, welche nur in der Mitte des Randes bei a einen ganz kleinen Ausschnitt hat, um das Licht durchzulassen. Der Ausschnitt ist so klein, daß ein vertical darüber gehaltenes Auge auch noch an der Kante a vorbei direct nach dem unter dem Prisma liegenden Blatte

Fig. 46.

weißes Papier sehen kann. Das Auge sieht dann auf dem Papiere durch das Prisma das Bild, und zugleich direct an der Kante a vorbei die Spitze eines mit der Hand gehaltenen Bleistifts, wodurch es möglich wird, mit dem Bleistifte die Umrisse des Bildes nachzuzeichnen.

§. 190. **Luftspiegelung.** Auf der totalen Reflexion beruht auch das intressante Phänomen der Luftspiegelung. Man versteht darunter die Erscheinung, daß man von weit entfernten Gegenständen bisweilen bald über, bald unter dem Gegenstande ein in der Luft schwebendes verkehrtes Bild desselben erblickt. Sind die Bilder unter dem Gegenstande, dann hat es den Anschein, als ob die Gegenstände an dem Wasserspiegel eines großen Sees lägen, durch welchen die Spiegelung hervorgebracht werde. Die über dem Gegenstande schwebenden Bilder werden hauptsächlich an Küsten, oder auf dem Meere beobachtet, und sind unter dem Namen der Erhebung oder des Seegesichtes bekannt. Bei dem normalen Zustande unserer Atmosphäre, bei welchem die Dichte der Luft in allmähligem Uebergange von Oben nach Unten zu wächst, wird die Erscheinung nicht wahrgenommen, sie kann also nur in einem abnormen Zustande derselben begründet sein. Solcher abnormen Zustände sind aber 2 denkbar. Es ist nämlich möglich, daß bei großer Sonnenhitze und ganz ruhiger Luft die unteren Luftschichten stark von dem Boden aus erhitzt werden, und daher dünner sind, als die höheren und kälteren, und daß sie dabei doch wegen der gänzlichen Abwesenheit von Luftströmungen über der Erdoberfläche gelagert bleiben, und nicht, wie es in der Regel der Fall ist, in die Höhe steigen. Es ist aber auch bei der schlechten Wärmeleitung des Wassers möglich, daß das Meerwasser noch von früheren Einwirkungen her eine bedeutend niedrigere Temperatur hat, als die Luft in einer gewissen Höhe über demselben. Auch hierdurch wird die allmähliche Abnahme der Dichte der Luft nach der Höhe unterbrochen werden können. Die unteren durch das Meerwasser abgekühlten Luftschichten können eine viel größere Dichtigkeit besitzen, als die höheren und wärmeren. Da in beiden Fällen Luftschichten von sehr verschiedener Dichte an einander stoßen können, so liegt für beide Fälle die Möglichkeit der totalen Reflexion an der Grenzfläche dieser Schichten vor, sie kann aber, wie wir bereits wissen, nur in der dichteren Luftschicht stattfinden. Denken wir uns in dem ersten Falle sowohl das Auge des Beobachters, als auch das Object, wenigstens zum Theil außerhalb der untersten sehr dünnen Luftschichten, so können wir den Gegenstand auf gewöhnliche Weise direct sehen, zugleich können aber auch von dem oberen Theile des Objectes ausgehende Strahlen an der Trennungsfläche der Luftschichten nach unserem Auge reflectirt werden. Wir werden also auch in der Richtung, in welcher diese letztern Strahlen in unser Auge gelangen, noch ein Bild des Gegenstandes gewahr werden, welches offenbar unter dem Gegenstande liegen muß. Daß es so scheint, als ob sich in der Umgebung ein See befinde, rührt daher, daß von der Bodenfläche aus durch die wärmere Luft Strahlen in unser Auge gelangen, welche alle zum Einfallsloth gebrochen werden, wodurch grade auf umgekehrte Weise, als im ersten und dritten Versuch von §. 187, die Bodenfläche tiefer gesenkt wird. Dadurch wird zwischen dem Gegenstande und der Bodenfläche ein leerer Raum erscheinen, der von uns, da er als heller Streifen beobachtet wird, als Wasser

Digitized by Google

angesehen wird. Denken wir uns nun in dem zweiten Fall sowohl das Auge des Beobachters, als auch den Gegenstand innerhalb der untersten abgekühlten Luftschichte, so sehen wir wieder den Gegenstand auf gewöhnliche Weise direct, zugleich können aber auch die nach Oben auf die Trennungsfläche fallenden Strahlen durch die totale Reflexion nach Unten nach unserem Auge reflectirt werden, wodurch uns dann natürlich ein über dem Gegenstande schwebendes Bild erscheinen muß. Daß nur von entfernten Gegenständen eine Luftspiegelung möglich ist, erklärt sich daraus, daß die Strahlen sehr schief auf die Trennungsfläche fallen müssen, wenn sie eine totale Reflexion erleiden sollen.

§. 191. **Geometrische Construction des gebrochenen Strahles.** Die in §. 188 aufgefundenen Gesetze geben uns ein Mittel an die Hand, für jeden einfallenden Strahl, dessen Richtung gegeben ist, auch die Richtung des gebrochenen Strahles durch Construction zu finden, sobald der Brechungsexponent beider Mittel bekannt ist.

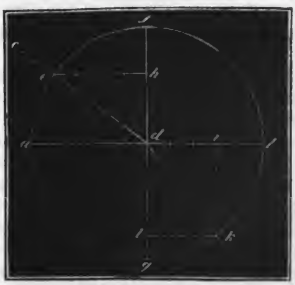


Fig. 47.

Es sei z. B. ab (Fig. 47) die Trennungsfläche zweier Medien, so daß über ab Luft und unter ab Wasser sich befinde, die Trennungsfläche treffe der Lichtstrahl cd, und es soll der Weg gefunden werden, welchen er von d aus im Wasser nimmt. Man beschreibe um d mit einem beliebigen Halbmesser de einen Kreis, errichte in d auf ab die Senkrechte fg, so ist fg das Einfallsloth, und ∢edf der Einfallswinkel. Nun ziehe man von e auf fg die Senkrechte eh, theile eh, weil das Brechungsverhältniß von Luft zu Wasser 4 : 3 ist, in 4 gleiche Theile, trage von d aus auf db 3 dieser Theile ab, errichte in i auf db die Senkrechte ik, verlängere sie, bis sie die Peripherie in k durchschneidet, und ziehe durch d und k die grade Linie dk, so zeigt diese die Richtung, welche der gebrochene Strahl im Wasser nimmt. Man fälle noch von k aus kl senkrecht auf dg. Nun ist wirklich gdk der Brechungswinkel, und dk der gebrochene Strahl, wenn sin. edf : sin. gdk = 4 : 3 ist. sin. $edf = \frac{eh}{ed}$, und sin. $gdk = \frac{kl}{dk} = \frac{di}{dk}$, also sin. edf : sin. gdk = $\frac{eh}{ed} : \frac{di}{dk}$, und, da ed = dk, sin. edf : sin. gdk = eh : di = 4 : 3.

Zeichnet man diese Figur auf ein Holzbrettchen, und taucht man dieses so vertical in das Wasser, daß ab mit dem Wasserspiegel zusammenfällt, und dk in das Wasser zu liegen kommt, so erscheint wirklich cdk als grade Linie.

§. 192. **Brechung durch Körper mit parallelen Flächen.** Betrachtet man den vierten in §. 187 beschriebenen Versuch etwas genauer, so wird man finden, daß immer das abgebrochene Stück der graden Linie mit den beiden aus dem Glase hervorragenden Enden derselben parallel bleibt.

Fig. 48.

Es seien ab und cd (Fig. 48) die parallelen Flächen des Glases, ef der auf die eine Seite auffallende Lichtstrahl, dann ist fg der Weg, welchen derselbe im Glase nimmt. Da, wo er bei g wieder in die Luft austritt, suche man durch die gleiche Construction den Weg gh des ausfahrenden Strahles. Nun wäre zu zeigen, daß gh stets parallel ef sein muß. Es ist $\sphericalangle$ kfg $=$ $\sphericalangle$ fgl, also auch sin. kfg $=$ sin. fgl; sin. kfg : sin. efi $=$ 2 : 3, und sin. fgl : sin. mgh $=$ 2 : 3, folglich sin. kfg : sin. efi $=$ sin. fgl : sin. mgh. Da aber sin. kfg $=$ sin. fgl, so muß auch sin. efi $=$ sin. mgh, und $\sphericalangle$ efi $=$ $\sphericalangle$ mgh sein. Es ist aber if $\|$ gm, also auch ef $\|$ gh. Wäre h ein leuchtender Punkt unter dem Glase, so würde also ein in e befindliches Auge ihn nicht in h, sondern in der Richtung pq sehen. Es geht also aus dieser Betrachtung hervor, daß wir, wenn wir durch einen durchsichtigen Körper, welcher von parallelen Flächen begrenzt wird, hindurch sehen, alle Gegenstände in ihrer richtigen gegenseitigen Lage zu einander erblicken, aber alle aus ihrer Stelle verrückt. Die Größe dieser Verrückung hängt, wie der Anblick der Figur lehrt, von der Dicke des durchsichtigen Körpers ab. Daß wir sie bei unseren Fensterscheiben nicht gewahr werden, rührt also blos daher, daß sie wegen der unbedeutenden Dicke derselben nur sehr gering ist.

Ganz auf dieselbe Weise kann auch gezeigt werden, daß ein Lichtstrahl, wenn er auch durch *mehrere* durchsichtige Körper mit parallelen Oberflächen hindurchgegangen ist, doch aus dem letzten in einer Richtung ausfährt, welche seiner ursprünglichen Richtung parallel ist.

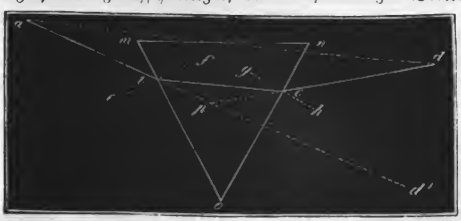
§. 193. **Brechung durch Körper mit geneigten Flächen; Prisma.** Man nehme einen durchsichtigen Körper (etwa ein Glasstück) mit zwei gegen einander geneigten ebenen Flächen, und sehe durch diese Flächen nach einem Gegenstande hin, doch so, daß die Kante, in welcher sie beide ebene Flächen wirklich durchschneiden, oder doch durchschneiden würden, horizontal nach Unten liegt, so sieht man den Gegenstand nicht. Um ihn zu sehen, muß man dem Auge eine nach tiefer liegenden Stellen gehende Richtung geben, oder, wenn die Breite der Flächen nicht groß genug ist, müssen wir sogar den durchsichtigen Körper selbst niedriger halten. Wir sehen also die Gegenstände tiefer, als sie wirklich sind. Daß wir sie auch mit farbigen Rändern umgeben erblicken, soll hier noch unerörtert bleiben, da in der Folge ausführlich davon geredet werden wird. Sehen wir, ohne die Lage des durchsichtigen Körpers zu ändern, nach einander nach verschiedenen in gleicher Höhe befindlichen Gegenständen, so sehen wir sie nicht alle gleich tief, sondern um so tiefer, je mehr sie sich seitwärts befinden. So erscheinen die horizontalen Fensterstäbe gekrümmt, und zwar mit der erhabenen Seite nach Oben. Wird die Kante horizontal nach Oben gehalten, so sehen wir

Digitized by Google

die Gegenstände nach Oben verrückt. Gibt man nun der Kante des durchsichtigen Körpers eine verticale Lage, so werden die Gegenstände nach der rechten oder linken Seite verrückt, je nachdem die Kante auf der rechten oder linken Seite sich befindet. Die Verrückung geschieht also immer nach der Seite der Kante hin. Wenn man durch den durchsichtigen Körper das Bild eines Gegenstandes betrachtet, und bringt ihn dann durch allmählige Drehung um seine Längenare, ohne daß dabei diese ihre Richtung verändert, in verschiedene Lagen, so wird man finden, daß die Verrückung nicht für alle Lagen gleich groß ist.

Ehe wir zur Erklärung dieser Erscheinungen gehen, wollen wir uns wieder folgende Definitionen merken. Ein solcher durchsichtiger Körper, welcher zwei gegen einander geneigte Grenzflächen hat, heißt in der Optik ein Prisma. Die Basis eines Prisma's ist dann die der Kante gegenüberliegende Fläche. Der Flächenwinkel, welchen die beiden zu einander geneigten ebenen Flächen an der Kante bilden, wird der brechende Winkel des Prisma's genannt, und unter dem Hauptschnitt eines Prisma's versteht man den Durchschnitt desselben mit einer auf seiner Kante rechtwinkligen Ebene. Die gewöhnlich angewandten Prismen sind dreiseitige, gerade Prismen, für solche ist dann natürlich der Hauptschnitt ein Dreieck. Ein Prisma nennt man ein gleichseitiges oder gleichschenkliges, oder rechtwinkliges, wenn der Hauptschnitt ein gleichseitiges, oder gleichschenkliges, oder rechtwinkliges Dreieck ist.

Fig. 49.



mno (Fig. 49) sei der Hauptschnitt eines Prisma's, also o die Projection der Kante, und mn der Basis, ab sei ein in der Ebene des Hauptschnitts auf das Prisma auffallender Lichtstrahl. Durch Anwendung der Construction in §. 191 findet man den Weg bc, welchen derselbe im Prisma nimmt; der Lichtstrahl wird dem Einfallslothe ef jedenfalls genähert, weil bei Luft und Glas der Brechungswinkel im Glase kleiner ist, als der Einfallswinkel in der Luft. Bei c trifft der Strahl auf die Trennungsfläche no. Es muß also hier noch einmal die geometrische Construction angewandt werden, um die Richtung cd des ausfahrenden Strahles zu finden; jedenfalls entfernt sich cd weiter von dem Einfallslothe gh, als bc. Denken wir uns nun, in d sei ein leuchtender Punkt, und in a das Auge, so können wir offenbar den Punkt d nicht in der Richtung ad, sondern nur in der Richtung ad' sehen. Hieraus geht hervor, daß die Verrückung immer nach der Kante zu stattfindet, oder, wie man es auch ausdrücken kann, daß ein Lichtstrahl bei seinem Durchgang durch ein Prisma immer nach der Basis zu gebrochen wird. Die Größe der Verrückung wird offenbar gemessen durch den Winkel dpd', welchen die Richtung des einfallenden Strahles mit der Richtung des ausfahrenden macht, weßhalb auch dieser Winkel die Ablenkung genannt wird. Am kleinsten ist nun dieser Winkel in dem Falle, wenn die Ebenen mo und

Digitized by Google

no parallel sind, denn dann sind, wie wir gesehen haben, der einfallende und der ausfahrende Strahl parallel, und durchschneiden sich erst in unendlicher Entfernung. Die Ablenkung muß demnach desto größer werden, je mehr sich die gegenseitige Lage der Ebenen mo und no von der parallelen Lage entfernt, d. h. je größer der brechende Winkel wird. Die von seitwärts befindlichen Objecten ausgehenden Strahlen können nicht in die Ebene eines Hauptschnitts fallen, sondern nur in eine Ebene, welche das Prisma schief durchschneidet. Ein solcher Durchschnitt ist zwar ebenfalls ein Dreieck, aber mit um so größerem Winkel bei o, je schiefer die Richtung des Strahls gegen das Prisma ist. Objecte, von welchen diese Strahlen ausgehen, werden also, da für sie die Ablenkung des Prisma's größer ist, auch tiefer gesehen werden, als andere in gleicher Höhe, deren Strahlen aber nicht so schief auf das Prisma auffallen. Aus dem letzten Theil des angeführten Versuches lernen wir aber, daß die Ablenkung nicht blos von der Größe des brechenden Winkels abhängt, da sie sich auch verändert, wenn das Prisma um seine Längenare gedreht wird, ohne daß diese letztere ihre Richtung verändert. Durch die Drehung wird offenbar die Richtung des einfallenden Strahls zur brechenden Fläche verändert, d. h. es wird die Größe des Einfallswinkels verändert. Die Größe der durch ein Prisma bewirkten Ablenkung wird also sowohl durch die Größe des brechenden Winkels, als auch durch die Größe des Einfallswinkels bedingt. Es kann jedoch nicht ohne Hilfe der Berechnung nachgewiesen werden, daß für ein und dasselbe Prisma die durch dasselbe bewirkte Ablenkung am kleinsten ist, wenn der Lichtstrahl so durch das Prisma geht, daß er mit den beiden brechenden Flächen gleiche Winkel macht. Wie wir nun gesehen haben, daß durch den Brechungsexponenten die Ablenkung gefunden werden konnte, so muß es umgekehrt auch möglich sein, aus einer beobachteten Ablenkung den Brechungsexponenten zu finden. Am besten bedient man sich dabei des Winkels der kleinsten Ablenkung. Auf eine nähere Erläuterung der Methode kann jedoch nach dem Zwecke dieses Buches nicht eingegangen werden.

§. 194. **Linsen.** Bisher hatten die durchsichtigen Körper, durch welche wir das Licht brechen ließen, nur ebene Flächen. Es entsteht daher auch die Frage, auf welche Weise die Brechung erfolge, wenn der durchsichtige Körper wenigstens theilweise gekrümmte brechende Flächen hat. Solche durchsichtige Körper nennt man Linsen. Wie wir aber bei den gekrümmten Spiegeln nur auf Spiegel von der einfachsten Krümmung, der Kugelkrümmung, Rücksicht nahmen, so werden wir auch hier nur solche Linsen in Betracht ziehen, deren Grenzflächen nur Stücke von Kugeloberflächen und Ebenen sind, also nur die sphärischen Linsen. Man unterscheidet sie zunächst in die zwei großen Klassen der Convex- und der Concavlinsen. Jede dieser Klassen hat drei Unterabtheilungen. Zu den Convexlinsen werden gerechnet: 1) die biconveren Linsen mit beiderseits erhabenen Flächen, 2) die planconveren, deren eine Seite erhaben, die andere aber plan oder eben ist, und 3) die concav-converen oder die Menisken, mit einer erhabenen und einer hohlen Fläche, von welchen aber erstere stärker gekrümmt ist, als letztere. Zu den Concavlinsen gehören: 1) die biconcaven mit zwei hohlen Flächen, 2) die planconcaven mit einer hohlen und einer planen Fläche, und 3) die convex-concaven mit einer hohlen und einer erhabenen Fläche, von welchen

aber die erstere eine bedeutendere Krümmung hat, als die letztere. Die Converlinsen sind also sämmtlich in der Mitte dicker, als am Rande, während umgekehrt die Concavlinsen am Rande dicker sind, als in der Mitte. Die Axe einer Linse ist diejenige grade Linie, welche die Mittelpunkte der beiden Kugeloberflächen, durch welche die Linse gebildet wird, mit einander verbindet; unter dem optischen Mittelpunkte der Linse versteht man denjenigen Punkt der Axe, welcher in der Mitte zwischen beiden Grenzflächen liegt. Bei den planconveren und planconcaven Linsen versteht man unter der Axe das von dem Kugelmittelpunkte auf die Ebene gefällte Perpendikel. Eine Linse heißt centrirt, wenn alle ihre Theile um die Axe symmetrisch liegen. Von den zwei Flächen der Linse nennt man diejenige, welche dem Gegenstande zugekehrt ist, die Vorderfläche oder Vorderseite, die andere die Hinterfläche oder Rückseite. Jede Converlinse kann gewissermaßen als 2 mit ihrer Basis zusammenstoßende Prismen, und jede Concavlinse als zwei mit ihrer brechenden Kante zusammenstoßende Prismen angesehen werden.

§. 195. **Brechung durch sphärische Converlinsen; camera obscura, Guckkasten, Panoramen.** Wenn man in einem dunkelen Zimmer eine Kerzenflamme aufstellt, und die von derselben ausgehenden Strahlen in großer Entfernung mit einer biconveren Linse auffängt, so entsteht auf der Rückseite der Linse ein physisches, umgekehrtes und sehr verkleinertes Bild der Flamme, welches sich in der Nähe der Linse durch eine mattgeschliffene Glastafel auffangen und sichtbar machen läßt. Je näher die Flamme der Vorderseite der Linse gebracht wird, desto weiter rückt das Bild derselben von der Rückseite weg, desto weiter muß man also auch die auffangende Glastafel entfernen; das Bild bleibt aber umgekehrt, und wird immer größer, je mehr die Flamme der Linse sich nähert. Bei allmähliger Näherung der Flamme wird dieselbe in einen Abstand von der Linse gebracht werden können, bei welchem das Bild von der Rückseite eine ebenso große Entfernung hat. In diesem Falle ist das Bild zwar noch verkehrt, aber an Größe dem Objecte gleich. Bei noch weiterer Annäherung rückt das Bild selbst in einen größeren Abstand, bleibt verkehrt, ist aber von nun an größer, als der Gegenstand. Man wird jetzt bald zu einem Abstande der Flamme von der Linse gelangen, für welchen gar kein Bild mehr erscheint. Rückt man dann mit der Flamme noch näher, so erscheint auf der Rückseite gar kein physisches, auffangbares Bild mehr, aber ein auf der Rückseite der Linse befindliches Auge sieht durch dieselbe auf der Vorderseite ein geometrisches Bild des Gegenstandes, welches stets aufrecht und vergrößert ist. Es nimmt an Größe ab, und nähert sich der Linse, je mehr der Gegenstand selbst der Linse näher kommt.

Nach dieser Zusammenstellung der Erscheinungen, welche biconvere Linsen darbieten, zeigt sich also eine auffallende Aehnlichkeit zwischen den Erscheinungen der biconveren Linsen und den sphärischen Hohlspiegeln. Wir werden demnach auch hier wieder denselben Weg der Erklärung einzuschlagen versuchen, wie bei den Hohlspiegeln. Wir sehen zunächst wieder den Gegenstand als ein Aggregat leuchtender Punkte an, und untersuchen nach den bekannten Brechungsgesetzen das Verhalten eines leuchtenden Punktes zu den biconveren Linsen. Da wir auch hier den leuchtenden Punkt zuerst in der Axe, und dann außerhalb derselben liegen lassen, so fragt es sich

Digitized by Google

noch, was man in dem letzteren Falle bei den Linsen unter dem Hauptstrahl (Nebenare) eines solchen Punktes zu verstehen habe. Es ist der durch den optischen Mittelpunkt gehende Strahl, welcher als ungebrochen durch die Linse hindurchgehend angesehen werden kann, weil die Berührungsebenen der Linse an den Orten seines Ein- und Austritts einander sehr nahe parallel sind. Daß ein in der Richtung der Are auf die Linse fallender Strahl ebenfalls ungebrochen hindurchgeht, beruht darauf, daß die Are beide Grenzflächen der Linse senkrecht durchschneidet. Um uns zur Auffindung des Weges, welchen ein Lichtstrahl bei seinem Durchgang durch ein Linsenglas nimmt, wieder der geometrischen Construction bedienen zu können, müssen außer dem Brechungsverhältniß der Luft und des Stoffes, aus welchem die Linse angefertigt ist, auch die Mittelpunkte der beiden Kugeln, von deren Oberflächen die Flächen der Linse Theile sind, bekannt sein, da aus den in §. 185 angeführten Gründen die nach den Punkten, wo die Strahlen die Oberfläche der Linse treffen, gezogenen entsprechenden Radien wieder die Einfallslothe bilden. Ohne hier für die einzelnen Fälle die geometrische Construction wirklich auszuführen, wollen wir nur die auf diesem Wege gewonnenen Resultate zusammenstellen. Alle Strahlen, welche parallel mit der Are und zugleich derselben sehr nahe auf eine biconvere Linse auffallen, welche also von einem in unendlicher Entfernung befindlichen leuchtenden Punkte ausgehen, werden durch diese so gebrochen, daß sie die Are in einem und demselben Punkte durchschneiden. Man nennt diesen Punkt aus den in §. 185 angegebenen Gründen den Brennpunkt oder Focus, und die Entfernung desselben von der Linse die Brennweite, Focalweite der letzteren.

Da jede Fläche einer biconveren Linse als Vorderseite benutzt werden kann, so hat jede biconvere Linse zwei Brennpunkte, also auch zwei Brennweiten. Der Brennpunkt liegt immer der Linse näher, als der Kugelmittelpunkt. Es geht daraus zugleich hervor, daß die Brennweite einer Linse um so kürzer ist, je kleiner der Kugelradius, d. h. je stärker die Linse gekrümmt ist. Ist umgekehrt ein leuchtender Punkt in dem Brennpunkte einer Linse, so müssen durch die Brechung die aus der Linse ausfahrenden Strahlen der Are parallel sein *). Rückt der leuchtende Punkt der Are aus unendlicher Entfernung näher, dann werden die von ihm ausgehenden Strahlen nach der Brechung in einem Punkte vereinigt, welcher weiter von der Linse absteht, als der Brennpunkt, und zwar um so weiter, je näher der leuchtende Punkt heranrückt; ist er bis in den einen Kugelmittelpunkt gekommen, dann hat sich sein Bild bis zu dem andern Kugelmittelpunkt entfernt. Daraus folgt wieder durch Umkehrung, daß, wenn der leuchtende Punkt zwischen dem Kugelmittelpunkt und dem Brennpunkte sich befindet, sein Bild einen größeren Abstand von der Linse hat,

*) Practische Verfahren, den Brennpunkt einer biconveren Linse zu bestimmen, gibt es 2. Entweder man läßt auf die Linse einen Büschel Sonnenstrahlen auffallen, und ermittelt durch Nähern und Entfernen eines dahinter gehaltenen Blattes Papier den Ort, wo das Sonnenbildchen am kleinsten wird, wo also die Strahlen am dichtesten zusammengebrochen sind. Oder man lasse in einem dunklen Zimmer die Strahlen eines leuchtenden Punktes auf die Linse fallen, und nähere der Linse den leuchtenden Punkt so lange, bis auf einer hinter die Linse gehaltenen Fläche ein heller Kreis von gleichem Durchmesser mit der Linse gesehen wird.

Digitized by Google

als der Kugelmittelpunkt, und zwar einen um so größeren, je näher der leuchtende Punkt dem Focus kommt. Liegt der leuchtende Punkt innerhalb der Brennweite, dann sind die aus der Linse austretenden Strahlen noch divergent, wenngleich weniger, als die eintretenden. Sie vereinigen sich also auf der Rückseite der Linse gar nicht. Einem Auge aber, welches sich in dem von ihnen gebildeten Strahlenkegel befindet, scheinen sie von einem Punkte herzukommen, welcher auf der Vorderseite liegt, und wegen der geringeren Divergenz weiter von der Linse absteht, als der leuchtende Punkt. Ist der leuchtende Punkt gar kein Punkt der Are, so muß der Vereinigungspunkt der Strahlen auf dem Hauptstrahle liegen, weil dieser ungebrochen hindurchgeht. Da die Are und der Hauptstrahl sich in der Linse durchschneiden, so müssen der leuchtende Punkt und der Vereinigungspunkt in diesem Falle stets auf entgegengesetzten Seiten der Are liegen. Der Abstand beider von der Linse ist aber in den verschiedenen Fällen ganz entsprechend, wie bei der Are *).

*) Die Lage des Bildes läßt sich auch hier wieder für alle die verschiedenen Fälle aus einer einzigen Formel berechnen.

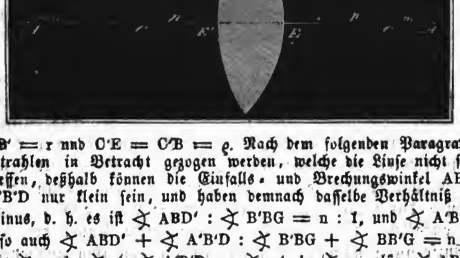


Fig. 50.

Es sei MN (Fig. 50) der Durchschnitt einer biconveren Linse, C und C′ die Mittelpunkte von ME′N und MEN, A der leuchtende Punkt, A′ sein Bild, die Entfernung AE sei = d, und die Entfernung A′E′ = δ, der Brechungsinder sei n, und man setze n − 1 = a, CE′ = CB′ = r und C′E = C′B = ϱ. Nach dem folgenden Paragraph dürfen nur solche Strahlen in Betracht gezogen werden, welche die Linse nicht sehr weit von der Are treffen, deßhalb können die Einfalls- und Brechungswinkel ABD′, B′BG, BB′G und A′B′D nur klein sein, und haben demnach dasselbe Verhältniß zu einander, wie ihre Sinus, d. h. es ist ∢ ABD′ : ∢ B′BG = n : 1, und ∢ A′B′D : ∢ BB′G = n : 1, also auch ∢ ABD′ + ∢ A′B′D : ∢ B′BG + ∢ BB′G = n : 1. Nun ist ∢ ABD′ = ∢ m + ∢ p′, ∢ A′B′D = ∢ m′ + ∢ p, also ∢ ABD′ + ∢ A′B′D = ∢ m + ∢ p′ + ∢ m′ + ∢ p. Ferner ist ∢ B′BG + ∢ BB′G = ∢ BGC = ∢ p′ + ∢ p; also ist (∢ m + ∢ p′ + ∢ m′ + ∢ p) : (∢ p′ + ∢ p) = ∢ p′ + ∢ p = n − 1 : 1 oder ∢ m + ∢ m′ : ∢ p + ∢ p′ = n − 1 : 1, ∢ m + ∢ m′ = (n − 1) (∢ p + ∢ p′) = (n − 1) ∢ p + (n − 1) ∢ p′. Die kleinen Bögen BE und B′E′ können ohne erheblichen Fehler als grade Linien, und senkrecht auf die Are AA′ angesehen werden, dann sind ABE, A′B′E′, CB′E′ und C′BE rechtwinklige Dreiecke, also $\frac{BE}{EA}$ = tang. m, $\frac{B'E'}{E'A'}$ = tang. m′, $\frac{B'E'}{E'C}$ = tang. p und $\frac{BE}{EC'}$ = tang. p′. Die Tangenten kleiner Winkel sind aber den Winkeln selbst proportional. Wir können also in der Gleichung ∢ m + ∢ m′ = (n − 1) . ∢ p + (n − 1) . ∢ p′ statt der Winkel die für die Tangenten derselben gefundenen Werthe substituiren, dann ist $\frac{BE}{EA} + \frac{B'E'}{E'A'} = (n-1)\frac{B'E'}{E'C} + (n-1)\frac{BE}{EC'}$. Die Bögen BE und B′E′ können bei der verhältnißmäßig geringen Dicke der Linsengläser und der Kleinheit der Winkel m und m′ als gleich angesehen werden. Dividiren wir demnach

Digitized by Google

Soll nun endlich durch Construction über Lage, Größe und Entfernung der Bilder ganzer Objecte entschieden werden, so braucht man nur nach dem Bisherigen den Ort der Bilder zweier äußersten Punkte des Objectes zu bestimmen. Die Resultate werden ganz mit den zu Anfang dieses Paragraphen aufgeführten Erscheinungen übereinstimmen, wenn man die dort mangelnde nähere Bestimmung der Entfernung noch aus der gegebenen Entwicklung ergänzt.

Von der Anwendung der biconveren Linsen in den Mikroscopen und Teleskopen ist weiter unten (§. 216 seq.) die Rede.

Bei den zwei übrigen Arten der Converlinsen sind im Allgemeinen die Erscheinungen dieselben, wie bei den biconveren Linsen, weßhalb hier nicht weiter auf dieselben eingegangen werden soll.

Hier sollen noch einige Instrumente erwähnt werden, welche sich auf die Wirksamkeit der Converlinsen gründen. Dahin gehört die von dem Neapolitaner Porta im 17. Jahrhundert erfundene *camera obscura* (dunkle Kammer). Ihr Zweck ist die Darstellung von Bildern entfernter Gegenstände. Sie kommt hauptsächlich in zwei verschiedenen Constructionen vor, je nachdem man die Bilder darstellen will, um sie nachzuzeichnen, oder blos um sich an ihrem Anblicke zu erfreuen. Zum ersten Zweck besteht sie gewöhnlich aus einem ziemlich hohen Kasten, der die Gestalt einer abgestumpften Pyramide hat, und dessen Wände inwendig geschwärzt sind, um zu verhüten, daß die allenfalls auf die Seitenwände auffallenden Lichtstrahlen nicht durch Reflexion das hervorzurufende Bild stören. Durch die obere Wand geht eine bewegliche Röhre hindurch, in welcher eine Converlinse in horizontaler Lage gefaßt ist. Ueber der Converlinse ist außen noch ein Planspiegel angebracht, welcher unter einem Winkel von 45° gegen den Horizont geneigt ist. Die von einem Punkte eines fernen Gegenstandes herkommenden divergenten Strahlen treffen nun zunächst auf den Spiegel, und werden von diesem nach der Linse zurückgeworfen. Durch ihren Durchgang durch die Linse werden sie zusammengebrochen, und vereinigen sich in der Nähe des Brennpunktes der Linse. Steht also der Boden des Kastens etwa um die Brennweite der Linse von derselben ab, und befindet sich auf demselben ein Bogen Papier, so entsteht auf diesem letzteren ein Bild des Punktes. Die Bilder der verschiedenen Punkte geben das Bild des Gegenstandes. Die eine Seitenwand des Kastens ist in der Regel offen, damit der Nachzeichner mit seinem Oberkörper Zugang

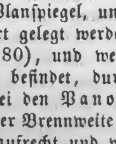
---

die letzte Gleichung durch BE oder B'E', so ist $\frac{1}{EA} + \frac{1}{E'A'} = (n-1)\frac{1}{E'C} + (n-1)\frac{1}{EC}$, oder wenn für EA, E'A', E'C, EC' und n — 1 die Werthe d, δ, r, ϱ und a substituirt werden, $\frac{1}{d} + \frac{1}{\delta} = \frac{a}{r} + \frac{a}{\varrho}$. Aus dieser Formel kann auch die Brennweite der Linse berechnet werden. Denn wird $d = \infty$ angenommen, dann ist δ die Brennweite, die wir mit f bezeichnen wollen; für $d = \infty$ ist $\frac{1}{d} = \frac{1}{\infty} = 0$, also $\frac{1}{f} = \frac{a}{r} + \frac{a}{\varrho}$. Werden die beiden Werthe von $\frac{a}{r} + \frac{a}{\varrho}$ einander gleich gesetzt, so erhält man $\frac{1}{f} = \frac{1}{d} + \frac{1}{\delta}$ und $\frac{1}{\delta} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d}$, d. h. der umgekehrte Werth der Entfernung des Bildes von der Linse ist gleich dem Unterschiede aus den umgekehrten Werthen der Brennweite und der Entfernung des Gegenstandes von der Linse (vergl. §. 183.).

Digitized by Google

hat. Das Eindringen des äußeren Lichtes wird dann durch das Ueberhängen eines dunkelgefärbten Vorhangs verhütet. Die Fassung der Linse muß beweglich sein, weil die Vereinigungsweite der Strahlen von verschieden entfernten Gegenständen eine verschiedene ist. Zum zweiten Zweck ist die camera obscura gewöhnlich ein kleinerer, viereckiger Kasten, durch dessen eine Seitenwand eine Röhre mit einer Converlinse hindurchgeht. Im Inneren liegt nun unter einem Winkel von 45° gegen die Are der Linse geneigt der Planspiegel, die obere Wand hat einen beweglichen Deckel, welcher aufgehoben, und an dessen Stelle eine mattgeschliffene Glastafel eingesetzt werden kann. Die Strahlen dringen hier unmittelbar durch die Linse, fallen, ehe sie sich vereinigen, auf den Planspiegel, und werden von diesem nach der mattgeschliffenen Glastafel reflectirt, wo ihre Vereinigung stattfindet, und also das Bild entsteht. Beim Guckkasten oder optischen Kasten steht man durch eine Converlinse von großer Brennweite nach einem hinter derselben befindlichen, unter einem Winkel von 45° geneigten Planspiegel, unter welchen Bilder von Städten, Landschaften u. s. w. verkehrt gelegt werden, die sich in dem Spiegel aufrecht stehend abspiegeln (§. 180), und weil das Spiegelbild innerhalb der Brennweite des Glases sich befindet, durch dieses vergrößert gesehen werden. Ganz ähnlich ist es bei den Panoramen, bei welchen perspectivische Zeichnungen innerhalb der Brennweite einer Converlinse aufgestellt und dann durch diese ebenfalls aufrecht und vergrößert gesehen werden.

§. 196. **Sphärische Aberration der Linsen.** Man nehme ein cylindrisches, mit Wasser gefülltes Glas, stelle es auf einen Bogen weißes Papier, und halte die Flamme einer kleinen Kerze hinter dasselbe, so erscheint auf dem Papier durch Brechung ein beleuchteter Raum, welcher von einer Curve begrenzt ist, die die Gestalt hat.



Schon der bloße Anblick dieses Versuches führt zur Vermuthung, daß wir es hier mit einer ganz ähnlichen Erscheinung zu thun haben, wie diejenige ist, welche wir im §. 184 bei den Hohlspiegeln kennen gelernt haben. Die in dem vorigen Paragraph mitgetheilten Resultate der geometrischen Construction, nach welchen die von einem Punkte ausgehenden Strahlen sich auch wirklich wieder in einem Punkte vereinigen, sind auch wirklich nur für den Fall richtig, daß die Flächen der Linse nur kleine Abschnitte der Kugeloberfläche sind, daß also die Strahlen nahe bei der Are die Linse treffen. Sind die Flächen der Linse größere Abschnitte der Kugeloberfläche, dann schneidet von den von einem Punkte ausgehenden Strahlen derjenige die Are am frühesten, welcher von der Are am entferntesten auf die Linse auffällt, wie dies Fig. 51 für die der Are parallelen Strahlen veranschaulicht wird.

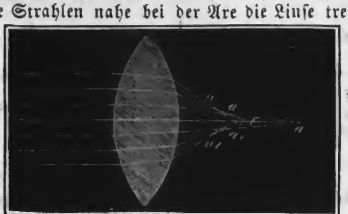


Fig. 51.

Ziehen wir durch a'', a', a, a_1 und a_2 eine Linie, so entsteht die obige Curve. Sie heißt ebenfalls Brennlinie, oder, zum Unterschiede von der durch Reflexion erzeugten, diakaustische Linie. Daß der von der Curve eingeschlossene Raum ein beleuchteter sein müsse, geht aus dem

Digitized by Google

Anblick der Figur hervor. Da nun die von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahlen nicht wirklich nur einen einzigen Vereinigungspunkt haben, sondern sich in verschiedenen Punkten durchschneiden, so muß dadurch offenbar eine Undeutlichkeit der Bilder herbeigeführt werden. Dieser Mangel der sphärischen Linsen ist, wie bei den sphärischen Hohlspiegeln, in der Kugelkrümmung begründet, und heißt daher bei ihnen ebenfalls die sphärische Aberration oder die Abweichung wegen der Kugelgestalt. Um die Undeutlichkeit der entstehenden Bilder zu vermindern, bedeckt man gewöhnlich die in feineren optischen Instrumenten angebrachten biconveren Linsen mit einem geschwärzten Ringe (einer Blendung), durch welchen die Randstrahlen abgehalten werden, und nur den centralen Strahlen ein Durchgang durch die Linse gestattet wird.

§. 197. **Brechung durch sphärische Concavlinsen.** Durch eine Concavlinse oder Hohllinse erhält man unter keinen Umständen auf der Rückseite ein physisches Bild eines Objectes, dagegen erscheint stets, wenn man von der Rückseite aus nach dem Objecte hinsieht, ein geometrisches Bild desselben. Dieses ist immer aufrecht und verkleinert, und zwar desto kleiner, je weiter der Gegenstand von der Linse absteht. Die Entfernung des Bildes von der Linse hängt ebenfalls von der Entfernung des Gegenstandes ab, sie wird aber desto kleiner, je näher der Gegenstand kommt. Die Erscheinungen, welche durch Concavlinsen beobachtet werden, sind also denen der Converspiegel ganz entsprechend.

Zur Erklärung wende man wieder die geometrische Construction an, setze erst einen leuchtenden Punkt in der Richtung der Are, dann außerhalb der Are, und endlich ein ganzes Object als ein Aggregat leuchtender Punkte voraus. Man wird zu folgenden Resultaten gelangen. Strahlen, welche parallel mit der Are auffallen, werden nach der Brechung divergiren, so daß sie, wenn man sie sich rückwärts verlängert denkt, die Are auf der Vorderseite in einem und demselben Punkte durchschneiden. Diesen Punkt nennt man den Zerstreuungspunkt oder negativen Brennpunkt, und die Entfernung desselben von der Linse die Brennweite. Ist der leuchtende Punkt in endlicher Entfernung und auf der Are, so daß die von ihm ausgehenden Strahlen divergent auf die Linse treffen, so werden sie nach der Brechung noch divergenter. Je näher der leuchtende Punkt ist, desto divergenter sind die auffallenden Strahlen, desto stärker divergiren also auch die Strahlen nach der Brechung. Deßwegen liegt der Punkt, in welchem die Verlängerungen der ausfahrenden Strahlen die Are durchschneiden, desto näher der Linse, je näher der leuchtende Punkt derselben ist. Für den Fall, daß der leuchtende Punkt außerhalb der Are liegt, ist das Gesagte nur auf den Hauptstrahl statt auf die Are zu beziehen *).

*) Auch für die Concavlinsen läßt sich der Ort des Bildes nach der in §. 195 mitgetheilten dioptrischen Hauptformel berechnen. Man muß nur dabei bedenken, daß jetzt die Mittelpunkte der Vorder- und der Rückseite auf entgegengesetzten Seiten, wie bei den Converlinsen liegen, also die Halbmesser negativ genommen werden müssen. Dasselbe gilt auch von der Brennweite. Die Formel für Concavlinsen ist also entweder $\frac{1}{d} + \frac{1}{\delta} = -\left(\frac{a}{r} + \frac{a}{\varrho}\right)$ oder $\frac{1}{\delta} = -\left(\frac{1}{f} + \frac{1}{d}\right)$. Daß für planconvere und planconcave Linsen der Radius der ebenen Fläche $= \infty$ gesetzt werden muß, und daß dadurch in der Formel entweder $\frac{a}{r}$ oder $\frac{a}{\varrho}$ zu Null wird, versteht sich von selbst.

Auch bei den Concavlinsen gilt die Behauptung, daß sich die verlängerten ausfahrenden Strahlen in demselben Punkte durchschneiden, nur für solche Strahlen, welche sich nicht weit von der Axe entfernen. Die Concavlinsen leiden demnach ebenfalls an der sphärischen Aberration. Um die Bilder ganzer Objecte zu suchen, sucht man nach dem Vorhergehenden die Bilder der äußersten gegenüberliegenden Punkte der Objecte. Das Ergebniß wird mit den zu Anfang des Paragraphen angeführten Erfahrungen übereinstimmen, und zugleich zeigen, daß in allen Fällen die Bilder innerhalb der Brennweite liegen müssen. Trotzdem daß alle durch Concavlinsen erzeugten Bilder innerhalb der Brennweite liegen, scheint doch ein Gegenstand, welchen man durch eine Concavlinse betrachtet, entfernter zu sein, als wenn wir ihn ohne Anwendung der Linse sehen. Der Grund liegt darin, daß das Bild verkleinert ist, und daß wir einen Gegenstand von bekannten Dimensionen in einer um so größeren Entfernung von uns befindlich glauben, je kleiner er uns erscheint (§. 212).

Da parallele Strahlen durch Converlinsen convergent, durch Concavlinsen dagegen divergent gemacht werden, so nennt man erstere auch *Sammelgläser* und letztere *Zerstreuungsgläser*.

§. 198. **Zerlegung des weißen Lichtes in seine Bestandtheile; Farbenzerstreuung.** 1) Läßt man in ein dunkles Zimmer durch eine feine Oeffnung Sonnenstrahlen eintreten, so bildet sich auf der gegenüberstehenden Wand ein rundes, weißes Sonnenbild ab. 2) Fängt man aber die eintretenden Strahlen durch ein horizontal gehaltenes Prisma mit der brechenden Kante nach Unten auf, so bemerkt man jetzt auf einer 10 bis 12 Fuß entfernten Wand statt des weißen, runden Sonnenbildes ein Bild, das nicht rund, sondern länglich, oben und unten von Kreisbögen und an den Seiten von parallelen graden Linien begrenzt ist. Dieses Bild ist auch nicht mehr weiß, sondern farbig, und zwar unterscheidet man von Unten nach Oben folgende Farben: Roth, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo und Violett. Die Farben sind jedoch nicht scharf von einander abgegrenzt, sondern gehen ganz allmählig in einander über. Die einzelnen Farben verbreiten sich auch nicht über einen gleich großen Raum, Violett nimmt den größten, Orange den kleinsten Raum ein. Außerdem wird das Bild jetzt auch an einer höheren Stelle der Wand beobachtet, als in dem ersten Versuch. 3) Betrachtet man auf einer verticalen Wand durch ein horizontal gehaltenes Prisma mit der brechenden Kante nach Unten einen weißen Punkt auf schwarzem Grunde, so sehen wir statt des weißen Punktes an einer tieferen Stelle einen schmalen verticalen Streifen, mit denselben Farben gefärbt, nur ist die Aufeinanderfolge der Farben jetzt grade umgekehrt, so daß jetzt Roth die oberste und Violett die unterste Farbe ist. 4) Betrachtet man auf der Wand eine horizontale weiße Linie auf schwarzem Grunde durch das Prisma bei derselben Haltung desselben, so sehen wir statt der weißen Linie ebenfalls an einem tieferen Orte eine convergebogene farbige Fläche, welche auch nach Oben roth und nach Unten violett gefärbt ist. 5) Auf schwarzem Grunde seien über derselben wagrechten Linie zwei gleiche Quadrate, ein rothes und ein blaues; werden diese durch das Prisma betrachtet, so sehen wir das blaue Quadrat weiter von seiner Stelle gerückt, als das rothe.

Der erste Versuch ist Nichts Anderes, als die Erscheinung in der optischen Kammer (§. 172), und wurde hier nur zur Vergleichung mit

Digitized by Google

dem zweiten aufgeführt, welcher zuerst im Jahre 1666 von Newton angestellt worden ist. Aus dem zweiten Versuch ist uns auch schon klar, warum wir das Bild an einer höheren Stelle der Wand sehen; es ist dies nur eine Folge der Brechung durch das Prisma eines Theils, und der Art und Weise, wie das Prisma gehalten wird, anderen Theils (vergl. §. 193). Dagegen ziehen wir daraus, daß das Bild nicht mehr rund, sondern in die Länge gezogen, nicht mehr weiß, sondern in verschiedenen Farben gefärbt erscheint, mit Newton den Schluß, daß das weiße Licht ein zusammengesetztes, kein einfaches Licht sei, dessen verschiedene Bestandtheile sich durch einen verschiedenen Grad der Brechbarkeit und die verschiedene Empfindung von Farbe, welche sie in unserem Auge hervorbringen, von einander unterscheiden. Daraus, daß das durch das Prisma hervorgerufene Bild an der Stelle, welche dem Orte des weißen Sonnenbildes am nächsten ist, roth, und an der am weitesten davon entfernten Stelle violett erscheint, folgt, daß die rothen Strahlen die kleinste, und die violetten Strahlen die größte Brechbarkeit besitzen müssen. Jeder Bestandtheil des weißen Sonnenlichtes bringt also eigentlich nach seinem Durchgang durch das Prisma ein eigenes, in seine Farbe gefärbtes, rundes Sonnenbild hervor, deren theilweises Uebereinanderfallen dann dem Gesammtbilde die längliche, oben und unten von Kreisbögen begrenzte Gestalt gibt. Wollten wir aber, weil wir nur sieben Farben unterscheiden, auch nur sieben Bestandtheile annehmen, so würden die beiden Seitenbegrenzungen unmöglich als grade Linien erscheinen können, sondern müßten sich als aus lauter Kreisbögen zusammengesetzt zeigen. Dieser Annahme widerspricht aber auch der Versuch selbst, denn er zeigt, daß die von uns unterschiedenen Farben nicht scharf von einander abgegrenzt sind, sondern ganz allmählig in einander übergehen, so daß keine 2 unmittelbar über einander liegende Theile eigentlich ganz gleich gefärbt sind. Wir nehmen deßhalb mit gutem Grunde an, daß es nicht 7 verschiedene Bestandtheile sind, sondern eigentlich unendlich viele, und daß daher nicht 7 verschieden gefärbte runde Sonnenbilder über einander fallen, sondern unendlich viele, deren Mittelpunkte alle auf der durch die Mitte des Gesammtbildes von Oben nach Unten gezogenen graden Linie liegen. Hiermit wären denn auch die gradlinigen Seitenbegrenzungen erklärt. Die durch diesen Versuch hervorgebrachte Erscheinung nennt man das Newton'sche Farbenbild oder Farbenspectrum, und den Umstand, daß das weiße Licht durch die Brechung in verschiedene farbige Lichtgattungen zerlegt wird, nennt man die Farbenzerstreuung oder Dispersion des Lichtes. Daß die Längenausdehnung des Spectrums eines Theils von der Entfernung der auffangenden Wand von dem Prisma, und anderen Theils von dem brechenden Winkel des Prisma's, sowie von der Substanz, aus welcher dasselbe angefertigt ist, abhängt, bedarf wohl keiner weiteren Erläuterung. Der Unterschied des dritten Versuchs von dem zweiten erklärt sich leicht aus §. 193.

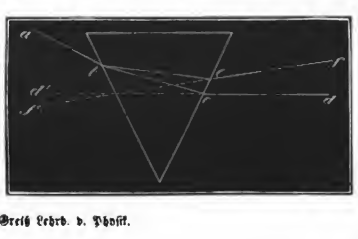


Fig. 52.

Denn wenn a (Fig. 52.)

Digitized by Google

der weiße Punkt auf dunklem Grunde ist, so wird ein von ihm ausgehender Strahl ab in dem Prisma in seine Bestandtheile zerlegt, der rothe, als der weniger brechbare, nehme den Weg bcd, der violette, als der brechbarste, den Weg bef. Gelangen diese in ein auf der Rückseite befindliches Auge, so sieht dieses den rothen Strahl offenbar in der Richtung dd', und den violetten in der Richtung ff'. Das Bild des Punktes liegt also tiefer, und ist oben roth und unten violett gefärbt. Im vierten Versuch sieht man nur die Linie als eine Reihe solcher Punkte an, deren jeder zu einem schmalen, senkrechten, farbigen Streifen wird. Die convere Krümmung ergibt sich aus §. 193, indem daselbst gezeigt ist, daß unter sonst gleichen Umständen für Strahlen, welche schiefer auf das Prisma auffallen, die Ablenkung größer ist. Der fünfte Versuch schließt sich dem dritten und vierten insofern an, als auch hier durch das Prisma nach dem Objecte hingesehen wird. Außerdem zeigt er, daß auch das von nicht selbstleuchtenden Körpern ausgehende farbige Licht in demselben Verhältniß eine verschiedene Brechbarkeit besitze, wie die verschiedenen Bestandtheile des directen Sonnenlichts.

§. 199. **Einfaches oder homogenes Licht.** Bringt man in dem Schirme, mit welchem man das Farbenbild auffängt, da, wo dasselbe hinfällt, eine ganz feine Oeffnung an, so geht durch diese nur eine der farbigen Lichtgattungen hindurch. Die hindurchgegangenen Strahlen fange man dann mit einem zweiten Prisma auf, und stelle in einiger Entfernung hinter dem zweiten Prisma einen zweiten Schirm auf. Man wird nun statt des länglichen wieder ein rundes Bild erhalten, das auch nicht mehr in verschiedenen Farben erscheint, sondern nur die Farbe zeigt, welche die hindurchgegangenen Lichtstrahlen hatten. Dagegen haben die Strahlen durch die neue Brechung abermals eine Ablenkung von ihrer Richtung erlitten, welche je nach der Farbe der Lichtstrahlen verschieden groß ist, um so größer, je weiter die Farbe von dem rothen Ende des Spectrums abliegt.

Dieser ebenfalls von Newton angegebene Versuch lehrt uns, daß die verschiedenen farbigen Lichtgattungen, in welche das weiße Sonnenlicht sich zerlegen läßt, nicht selbst wieder aus verschieden gefärbten und verschieden brechbaren Bestandtheilen zusammengesetzt seien, daß sie also einfaches, oder, wie Newton es nennt, homogenes Licht seien.

Wir haben nun auch in dem Prisma ein Mittel gefunden, welches uns in den Stand setzt, von dem von einem Objecte ausgehenden farbigen Lichte zu untersuchen, ob es einfaches, homogenes, oder zusammengesetztes Licht sei. Zu diesem Zwecke läßt man Strahlen desselben durch ein Prisma gehen, und beobachtet, ob dieselben in Strahlen von verschiedener Farbe zerlegt werden, oder nicht; im ersteren Fall ist das Licht zusammengesetzt, im letzteren einfach. So hält man z. B., wenn man untersuchen will, ob das durch ein farbiges Glas hindurchgehende Licht einfach oder zusammengesetzt ist, das Glas zwischen das Auge und das Prisma, und sieht, ob uns die Gegenstände mit Farbenrändern erscheinen oder nicht. Im ersteren Falle kann man sogar an den Farben, welche auftreten, erkennen, aus welchen farbigen Lichtgattungen das durchgegangene Licht zusammengesetzt war; man wird gewöhnlich finden, daß das von nicht selbstleuchtenden Körpern ausgehende farbige Licht aus verschiedenen farbigen Strahlen zusammengesetzt ist, Roth z. B. aus Orange und Violett, Orange

Digitized by Google

aus Roth und Gelb, Gelb aus Orange und Grün, Grün aus Gelb und Blau, Blau aus Grün und Violett, Violett aus Blau und Roth. Wenn man also 3 auf einander folgende Farben des Spectrums nimmt, so kann immer durch die Vereinigung der beiden Grenzfarben die Mittelfarbe erzeugt werden. Bei diesen Untersuchungen wird sich in der Regel nur die Farbe der rothen Gläser als eine einfache Farbe erweisen. So bemerkt man, wenn man durch ein Prisma nach einer Weingeistflamme, auf deren Docht man etwas Kochsalz gestreut hat, hinsieht, an der Flamme keine Farbenränder, weßhalb das Licht der Weingeistflamme als homogenes Gelb angesehen wird. Ebenso findet man, daß das Licht, welches durch schwefelsaures Kupferoxyd-Ammoniak*) hindurch gegangen ist, ein homogenes blaues Licht ist.

Der zu Anfang dieses Paragraphs angeführte Newton'sche Versuch läßt sich nach diesen Erfahrungen sehr vereinfachen. Man lasse nämlich die durch die feine Oeffnung eintretenden Strahlen erst durch ein rothes Glas gehen, ehe sie zu dem Prisma gelangen, dann zeigt sich ebenfalls statt des länglichen, farbigen Bildes nur ein rundes, rothes Bild, und zwar an der Stelle, wo ohne Anwendung des rothen Glases im Spectrum das Roth wahrgenommen wird.

§. 200. **Andere Unterschiede der verschiedenen Bestandtheile des weißen Lichtes.** 1) Menschen, welche längere Zeit an finsteren Orten leben, erfreuen sich selten einer kräftigen Gesundheit. 2) Pflanzen, welche in Zimmern oder Kellern aufbewahrt werden, wachsen stets nach der Seite hin, von welcher das Licht in diese Räume eindringt. 3) Pflanzen, längere Zeit im Dunkeln gehalten, verkümmern, ihre Blätter und Blüthen verlieren ihre frischen Farben. 4) Nur bei Anwesenheit des Lichtes vermögen die Pflanzen die aus ihrer Umgebung aufgenommene Kohlensäure zu zerlegen, den Kohlenstoff derselben, welcher zur Bildung des Blattgrün (Chlorophyll) nöthig ist, sich anzueignen, und den Sauerstoff gasförmig auszuscheiden, und der Atmosphäre zurückzugeben. Im Finstern bleibt die Kohlensäure ungeändert. 5) Das gewöhnliche Bleichen vegetabilischer Stoffe, z. B. der Leinwand, geschieht bekanntlich unter Einwirkung des Tageslichtes. Die färbenden Materien derselben werden zerstört, indem das Licht die Verbindung derselben mit dem Sauerstoff der atmosphärischen Luft befördert. 6) Wenn man ein Gemenge von einem gleichen Volumen Chlorgas und Wasserstoffgas in einer Flasche von weißem Glase der Einwirkung des directen Sonnenlichtes aussetzt, so erfolgt unter heftiger Explosion die Vereinigung beider Gase zu Chlorwasserstoffsäure augenblicklich. Wird das Gemenge vor der Einwirkung des Lichtes geschützt, so findet keine chemische Vereinigung der beiden Gase statt. 7) Man bestreiche einen Papierstreifen mit einer Auflösung von salpetersaurem Silberoxyd, und tauche ihn, nachdem er zuvor getrocknet war, in eine Kochsalzauflösung. Dadurch bildet sich auf seiner Oberfläche Chlorsilber. Wird dieser Streifen dem Sonnenlicht ausgesetzt, so wird er zuerst violett und später schwarz. Ein Theil des Chlors entweicht, und das Silber wird entweder ausgeschieden, oder

*) Man erhält diese schöne blaue Flüssigkeit, wenn man zu einer Kupfervitriollösung so lange Ammoniak gießt, bis der Niederschlag, der zuerst entsteht, sich wieder auflöst.

Digitized by Google

geht doch eine niedrigere Verbindung mit dem Chlor ein. Aehnliche Einwirkungen finden auf Jodsilber, Bromsilber statt. 8) Stellt man den sechsten Versuch in einer Flasche von rothem Glase an, so gelingt er nicht, wohl aber in einer Flasche von blauem oder violettem Glase. 9) Nimmt man ein Papier, das, wie im siebenten Versuche beschrieben wurde, präparirt ist, fängt auf demselben das durch ein Prisma erzeugte Spectrum auf, und sorgt durch Anwendung eines Heliostaten dafür, daß das Spectrum längere Zeit unverrückt an seiner Stelle gehalten wird, so findet man, daß das Papier am stärksten am violetten Ende des Spectrums, und sogar noch über dieses hinaus geschwärzt wird, daß aber die Einwirkung des Lichtes desto geringer gefunden wird, je näher man dem rothen Ende kommt, wo sie fast gänzlich verschwindet. 10) Wenn man die eine Hälfte einer Stahlnadel mit Papier verdeckt, und die andere Hälfte längere Zeit der Einwirkung von violettem Lichte aussetzt, so wird die Nadel in einigen Stunden magnetisch, und zwar erhält die unbedeckte Hälfte Nordmagnetismus. Die Farben vom anderen Ende des Spectrums zeigen sich selbst bei längerer Dauer des Versuchs wirkungslos.

Aus den sieben ersten Versuchen und Erfahrungen lernen wir, daß das weiße Licht außerdem, daß es uns die materiellen Gegenstände sichtbar macht, auch noch andere Wirkungen hervorzubringen vermag, physiologische und chemische (es leitet Verbindungen ein und hebt bestandene auf). Dagegen lehren der achte und neunte Versuch, daß nicht alle Bestandtheile desselben einen gleichen Antheil an diesen Wirkungen haben, daß diese Wirkungen vielmehr den nach dem violetten Ende des Spectrums hinliegenden vorzüglich zuzuschreiben sind. Der neunte Versuch zeigt sogar, daß noch brechbarere Strahlen als die violetten, welche von uns gar nicht mehr als Licht wahrgenommen werden, vorhanden sein müssen. Aus dem zehnten Versuch endlich sehen wir, daß die Strahlen, welche sich chemisch als die wirksameren erweisen, auch magnetische Wirkungen hervorrufen, was dagegen die übrigen nicht vermögen.

Von den chemischen Wirkungen des Lichtes hat man in der neuesten Zeit eine schöne Anwendung gemacht in der Photographie (φῶς, Licht und γραφειν, zeichnen). Der Wunsch, die schönen Bilder der camera obscura fixiren zu können, drängte sich gewiß manchem Beobachter derselben auf, doch erst im Jahre 1838 ist es Daguerre in Paris gelungen, ihn zu verwirklichen. Die camera obscura, deren man sich zur Darstellung der Lichtbilder bedient, unterscheidet sich von der im §. 195 beschriebenen dadurch, daß die obere Wand keinen beweglichen Deckel hat, und daß im Innern des Kastens der Planspiegel fehlt. Die Bilder werden nämlich auf der der Linse gegenüberliegenden Wand unmittelbar aufgefangen. Das Material, auf welchem die Daguerre'schen Lichtbilder dargestellt werden, sind silberplattirte Kupferplatten. Diese müssen zunächst sehr sorgfältig polirt werden, bis sie eine vollkommen glatte, gleichförmig spiegelnde Oberfläche erhalten. Ist dieses erreicht, so wird die Platte den Dämpfen von festem, oder in Alkohol gelöstem Jod, und zwar so lange ausgesetzt, bis sie eine goldgelbe oder röthliche Färbung angenommen hat. Will man sie für die Einwirkung des Lichtes noch empfindlicher machen, was zur Erzeugung namentlich guter Portraits sehr nothwendig ist, so nimmt man statt Jod eine Verbindung von Chlor oder Brom mit Jod. Nachdem die

Digitized by Google

Linse der camera so gestellt worden, daß auf der Hinterwand, wo die Platte eingesetzt werden soll, ein scharfes Bild des abzubildenden Gegenstandes entsteht, wird die so präparirte und vor dem Lichte bewahrte Platte in die camera obscura eingesetzt. Nach kurzer Zeit, welche sich im günstigen Falle auf wenige Secunden beschränkt, im ungünstigsten sich bis auf 2 Minuten ausdehnt, hat das Licht bereits an denjenigen Stellen, welche von seinen Strahlen getroffen wurden, eine chemische Wirkung auf das Jodsilber ausgeübt, ohne daß diese dem Auge sichtbar wäre. Nun wird die Platte herausgenommen, und bei einer Temperatur von 50 bis 55° R. Queckſilberdämpfen ausgesetzt. Durch die Einwirkung des Lichts haben die getroffenen Stellen ein größeres Vermögen, Dämpfe zu condensiren, erhalten, als die nicht getroffenen, und dieses Vermögen ist um so größer, je intensiver das Licht war. Durch die condensirten Queckſilberdämpfe wird das Bild sichtbar. Doch darf man die Platte so noch nicht lassen, weil die Oberfläche, soweit sie nicht von dem Lichte getroffen wurde, noch mit Jodsilber bedeckt ist, und folglich im Tageslichte fortwährenden Veränderungen durch das Licht unterworfen sein würde. Die Jodsilberschicht muß also von dem Silber entfernt werden, und es geschieht dies, indem man die Platte in eine wässerige Lösung von unterschwefligsaurem Natron, oder auch in eine siedend heiße, gesättigte Kochsalzlösung bringt, wodurch das Jodsilber gelöst wird. Nun wird die Platte noch mit destillirtem Wasser abgespült und getrocknet, und das Lichtbild ist fertig. Der Vorgang bei der Betrachtung eines solchen Bildes ist nun folgender. Die blanke Silberfläche bildet einen sehr vollkommenen Spiegel, und wirft demnach die auf sie fallenden Strahlen nur nach den Gesetzen der regelmäßigen Reflexion zurück. Wenn demnach unser Auge zur Platte eine solche Lage hat, daß die zurückgeworfenen Strahlen dasselbe nicht treffen können, so muß derjenige Theil der Platte, wo keine Queckſilberdämpfe condensirt wurden, dunkel erscheinen. Die Queckſilbertröpfchen an den übrigen Stellen dagegen zerstreuen das Licht nach allen Seiten, und bewirken dadurch, daß diese Stellen hell auf dunklem Grunde gesehen werden. Hat dagegen das Auge zur Platte eine solche Lage, daß die regelmäßig reflectirten Strahlen in dasselbe gelangen, dann erscheint bekanntlich auch der Grund hell im Vergleich zum Bilde. Läßt man die Platte zu lange in der camera obscura, dann fangen die von dem Lichte getroffenen Stellen des Jodsilbers an, sich zu schwärzen, und das Bild wird unmittelbar sichtbar. Da aber in solchen Bildern grade die hellsten Stellen sich am dunkelsten darstellen, so nennt man sie negative Bilder, während die anderen, bei welchen den hellsten Stellen des Gegenstandes auch die hellsten Partien des Bildes entsprechen, positive Bilder heißen. Der Umstand, daß die verschiedenfarbigen Strahlen nicht auf gleiche Weise chemisch auf das Jodsilber einwirken, indem namentlich die rothen und grünen Strahlen sich nur wenig wirksam erweisen, macht, daß bei Lichtbildern Licht und Schatten nie ganz richtig vertheilt sein können, da rothe und grüne Partien des Objects (z. B. Bäume) im Bilde stets zu dunkel erscheinen.

Die Daguerre'schen Lichtbilder haben in der neuesten Zeit einen großen Nebenbuhler in den Talbot'schen Lichtbildern auf Papier gefunden, welche jetzt eine immer größere Verbreitung gewinnen. Talbot präparirt zuerst ein für die Einwirkung des Lichtes sehr empfindliches Pa-

Digitized by Google

pier, dem er den Namen kalotypes Papier gegeben hat. Er bestreicht nämlich die eine Seite von gutem Schreibpapier mit einer schwachen Lösung von salpetersaurem Silberoxyd, trocknet es, bringt es dann in eine wässerige Lösung von Jodkalium, und trocknet es wieder. So zubereitet wird es, vor dem Lichte geschützt, aufbewahrt. Soll es zur Darstellung von Lichtbildern verwandt werden, dann wird es noch an einem finsteren Orte mit einem Gemenge von gleichen Raumtheilen von einer Lösung von salpetersaurem Silberoxyd, der man concentrirte Essigsäure zugesetzt hat, und von einer gesättigten Lösung von Gallussäure überstrichen. Ein solches Papier wird in die camera obscura gebracht, und nur ganz kurze Zeit in derselben gelassen. Nachdem es herausgenommen ist, wird es noch einmal mit dem genannten Gemenge überstrichen, und gelinde erwärmt, worauf das Bild kräftig hervortritt. Durch Behandlung mit Bromkaliumlösung wird es fixirt. Das von der camera obscura unmittelbar erzeugte Bild ist stets ein negatives, und dieses verwendet man, um mittelst desselben auf folgende Weise positive Abbilder zu machen. Man nimmt ein Bromsilberpapier oder Chlorsilberpapier (photographisches Papier), das man erhält, indem man Schreibpapier erst mit einer schwachen Lösung von salpetersaurem Silberoxyd, und dann noch mit einer Bromkalium- oder Kochsalzlösung überstreicht, legt das gewonnene negative Bild darauf, bringt dann beide zwischen 2 Glasplatten, und setzt sie dem Sonnenlichte aus. Die dunkeln Stellen des Bildes halten die Einwirkung des Lichtes von den darunter befindlichen Stellen des photographischen Papiers ab, während sie durch die hellen Stellen hindurch stattfindet. Die auf diese Weise entstehende Copie muß demnach ein positives Bild sein. Dasselbe negative Bild kann zur Anfertigung mehrerer positiver Bilder benutzt werden.

§. 201. **Zusammensetzung des weißen Lichtes aus seinen Bestandtheilen.** 1) Wenn man das Spectrum mit einer Converlinse auffängt, so sieht man in einer bestimmten Entfernung hinter der Linse auf einem Papierschirme oder einem mattgeschliffenen Glase einen kleinen, runden, weißen Fleck. Bringt man dann das mattgeschliffene Glas oder den Papierschirm in eine größere Entfernung von der Linse, so zeigt sich ein längliches farbiges Bild, dessen Farben aber in umgekehrter Ordnung auf einander folgen, als es ohne Anwendung der Converlinse der Fall sein würde. 2) Theilt man eine kreisförmige Scheibe in 7 Sectoren, welche sich so zu einander verhalten, wie die Räume, die von den einzelnen Farben im Spectrum eingenommen werden, bemalt die einzelnen Sectoren mit den entsprechenden Farben des Spectrums, und versetzt die Scheibe dann in eine schnelle drehende Bewegung, so erscheint sie nicht mehr farbig, sondern schmutzig weiß oder grau. Busolt'scher Farbenkreisel. 3) Wird das Farbenbild in geringer Entfernung von dem Prisma aufgefangen, so ist es bei der bisher angenommenen Lage auch jetzt oben violett, unten gelbroth, aber in der Mitte erscheint es weiß. 4) Betrachten wir eine verticale weiße Linie durch ein horizontal gehaltenes Prisma mit der brechenden Kante nach Unten, so sehen wir sie unten blau, oben gelbroth, in der Mitte aber weiß. 5) Eine weiße Fläche auf schwarzem Grunde zeigt, durch das Prisma betrachtet, oben und unten farbige Ränder, oben roth und gelb, unten blau und violett. 6) Eine schwarze Linie oder eine schwarze Fläche auf weißem Grunde zeigen ebenfalls oben und unten farbige Rän-

Digitized by Google

der, aber diese sind jetzt oben blau und violett, und unten roth und gelb. 7) Ueberhaupt zeigen fast alle Körper, durch das Prisma betrachtet, farbige Säume; nur sind diese bei denjenigen Körpern, welche dunkler als ihre Umgebung sind, oben blau und violett, bei denjenigen aber, welche heller, als ihre Umgebung sind, oben roth und gelb.

Im ersten Versuche fallen auf die Linse alle die verschiedenfarbigen Strahlen, in welche das Prisma das weiße Licht zerlegt hat; durch die Linse werden sie aber, wie wir früher gesehen haben, so gebrochen, daß sie alle in einem Punkte sich nach der Brechung durchschneiden müssen. Da nun, wenn sich der Papierschirm in diesem Punkte befindet, ein weißer Fleck entsteht, so ist damit der Beweis geliefert, daß das weiße Licht wirklich als eine Zusammensetzung aus allen den verschiedenen farbigen Lichtgattungen anzusehen ist. Der zweite Theil des Versuches, nämlich daß sich, wenn man den Papierschirm weiter entfernt, wieder ein längliches, farbiges Bild zeigt, in welchem aber die Farben in umgekehrter Ordnung auf einander folgen, erklärt sich leicht daraus, daß die Strahlen, nachdem sie sich in dem Vereinigungspunkte gekreuzt haben, wieder divergirend aus einander gehen, wodurch natürlich die Strahlen, welche früher unten waren, jetzt nach Oben liegen und umgekehrt. Der zweite Versuch lehrt ganz dasselbe, wie der erste Theil des ersten Versuches. Denn durch die rasche Drehung empfängt das Auge fast gleichzeitig die Eindrücke aller der einzelnen Farben, wodurch in demselben die Empfindung von Weiß hervorgerufen wird. Daß die Scheibe aber graulich-weiß erscheint, hat eines Theils seinen Grund darin, daß die angewandten Farben nie genau den prismatischen entsprechen, anderen Theils aber auch darin, daß wir nur 7 Farben in Anwendung bringen, während, wie wir gesehen haben, das weiße Licht aus unzählig vielen verschiedenen Farben zusammengesetzt ist. Zur Erklärung des dritten Versuchs müssen wir uns daran erinnern, daß eigentlich jede Farbe für sich ein rundes Bildchen erzeugt, und zwar so, daß von jedem folgenden der Mittelpunkt immer etwas höher liegt, als von dem vorhergehenden. Je näher nun dem Prisma das Spectrum aufgefangen wird, desto weniger sind auch die einzelnen Strahlen aus einander getreten, desto näher liegen also die Mittelpunkte bei einander, und desto mehr müssen die einzelnen runden Bildchen einander decken. In der Mitte werden sie noch alle theilweise auf einander fallen, weßhalb hier Weiß erscheint, während die äußersten wenigstens zu einem kleinen Theile unbedeckt bleiben, wodurch sich die farbigen Ränder oben und unten erklären. Ganz ähnlich ist es in dem vierten Versuch. Denn hier bildet jeder einzelne Punkt der weißen Linie einen ganz schmalen, verticalen farbigen Streifen. Diese farbigen Streifen bedecken sich wieder zum größten Theile, so daß die mittleren und unteren Farben des höchsten Punktes mit den oberen und mittleren des zweiten Punktes zusammenfallen u. s. f. Der fünfte Versuch erklärt sich dann dadurch, daß wir die weiße Fläche als eine Reihe von lauter verticalen, weißen Linien betrachten, von welchen immer die nächste an die vorhergehende anstößt. Im sechsten Versuch sehen wir die Farbensäume in umgekehrter Ordnung, weil es nicht Farbensäume der schwarzen Fläche sind, sondern des begrenzenden weißen Grundes; was also für die schwarze Fläche oben ist, ist für die Begrenzung unten und umgekehrt. Der letzte Versuch endlich findet dann seine Erklärung in den beiden vorhergehenden.

Digitized by Google

Als Hauptresultat unseres Paragraphen ergibt sich also der Satz, daß das weiße Licht ebenso, wie man es in seine farbigen Bestandtheile zerlegen kann, auch durch die Vereinigung aller dieser Bestandtheile wieder zusammengesetzt, erzeugt werden könne.

§. 202. **Complementäre oder Ergänzungsfarben.** 1) Man nehme eine Anzahl Streifen von etwas steifem Papier, welche alle mit den verschiedenen prismatischen Farben bemalt sind, setze den Farbenkreisel in eine schnelle rotirende Bewegung, und lege dann auf denselben bald mehr, bald weniger dieser Streifen, bald Streifen von dieser, bald von jener Farbe, so wird man ein äußerst mannichfaltig wechselndes Farbenspiel beobachten. 2) Man bemale eine Scheibe, wie im zweiten Versuch des vorigen Paragraphen mit den prismatischen Farben mit Ausnahme einer einzigen, so erscheint die Scheibe, auf den rotirenden Farbenkreisel gebracht, nicht mehr graulich-weiß, sondern von einer bestimmt ausgesprochenen Färbung. Welche Färbung beobachtet wird, hängt von der ausgelassenen Farbe ab; hat man z. B. das Roth ausgelassen, so erscheint sie grün. 3) Man fange die durch ein Prisma zerlegten farbigen Bestandtheile des weißen Lichtes wie in dem ersten Versuche des vorigen Paragraphen mit einer Converlinse auf, nur mit dem Unterschiede, daß man die Strahlen *einer* Farbe durch Vorhalten eines undurchsichtigen Körpers nicht auf die Linse gelangen läßt, so beobachtet man statt des runden weißen Flecks auf dem auffangenden Papierschirm jetzt einen farbigen Fleck. Die Farbe hängt auch hier davon ab, welche Strahlen von der Linse abgehalten worden sind. Waren es z. B. die rothen, so ist auch hier der Fleck wieder grün. 4) Bemalt man eine Scheibe blos mit Roth und Grün, oder mit Orange und Blau, oder mit Gelb und Violett, und bringt sie dann auf den schnell rotirenden Kreisel, so zeigt sich die Scheibe graulich-weiß.

Der erste Versuch lehrt uns, daß die verschiedenartigsten Farbentöne alle nur durch Mischung der einfachen prismatischen Farben hervorgebracht werden können. Der zweite und dritte Versuch zeigt, daß grade alle einfachen prismatischen Farben erforderlich sind, um in ihrer Vereinigung Weiß zu erzeugen. Diejenige Farbe, welche bei diesen Versuchen zum Vorschein kommt, bedarf also noch der fehlenden Farbe, wenn Weiß entstehen soll. Deßwegen nennt man die fehlende Farbe die *complementäre* oder *Ergänzungsfarbe* der beobachteten, weil sie sich gegenseitig zu Weiß ergänzen. Aus unseren Versuchen ergibt sich also Roth als complementäre Farbe von Grün und umgekehrt. Es entsteht nun die Frage, welche der anderen Farben sich gegenseitig zu Weiß ergänzen. Da, wie schon oben bemerkt wurde, Orange durch eine Mischung von Roth und Gelb, Grün durch Gelb und Blau, und Violett durch Blau und Roth hervorgebracht werden können, so kann man zur Vereinfachung nur Roth, Gelb und Blau als Grundfarben annehmen (eine Scheibe, mit diesen 3 Farben bemalt, und in schnelle Rotation versetzt, erscheint annähernd weiß). Fehlt nun Gelb, so bleibt Roth und Blau übrig; diese beiden geben zusammen Violett, also ist Gelb die complementäre Farbe von Violett und umgekehrt. Fehlt Blau, so bleibt Roth und Gelb übrig, welche in ihrer Vereinigung Orange geben, und Blau ist daher die complementäre Farbe von Orange und umgekehrt. Begreift man Blau und Indigo unter dem gemeinschaftlichen Namen Blau, so daß wir nur 6 prismatische Farben haben, und denken uns diese 6 in

Digitized by Google

2 Hälften getheilt, so daß Roth, Orange und Gelb die eine, Grün, Blau und Violett die andere Hälfte bilden, so ist also immer eine Farbe der ersten Hälfte die complementäre Farbe von der entsprechenden der zweiten Hälfte. Die eben gegebene Auseinandersetzung über Ergänzungsfarben wird durch den vierten Versuch experimentell bestätigt.

§. 203. **Farben der Körper.** Die Erfahrung lehrt, daß sowohl alle undurchsichtigen, als auch alle durchsichtigen Körper in unserem Auge die Empfindung einer gewissen Farbe hervorrufen.

Denken wir uns zunächst einen undurchsichtigen Körper, z. B. einen solchen, welcher uns roth erscheint. Er ist offenbar ebenso gut, wie alle ihn umgebenden Körper, von weißem Lichte beleuchtet. Würde er aber das auf ihn fallende Licht unverändert auch wieder reflectiren, so könnte er uns unmöglich roth, sondern er müßte weiß (eigentlich farblos) erscheinen. Dagegen erklärt sich seine Farbe vollständig durch die Annahme, daß er von dem auf ihn fallenden weißen Lichte vorzugsweise nur den rothen Bestandtheil, oder auch solche Bestandtheile, welche in ihrer Vereinigung Roth erzeugen, zurückwerfe, die übrigen Bestandtheile aber verschlucke (absorbire). Daß diese Erklärung auch auf undurchsichtige Körper von anderer Farbe Anwendung findet, braucht wohl nicht erst erwähnt zu werden. Die undurchsichtigen, farbigen Körper verschlucken also einen Theil des auf sie fallenden Lichtes, und zwar die verschiedenen Körper einen verschiedenen Theil, wie aus den äußerst mannichfaltigen Nüancirungen der Farbe hervorgeht. So gibt es nun auch Körper, welche alles auf sie fallende Licht absorbiren, und gar keinen Theil desselben zurückwerfen. Solche Körper müssen demnach ganz dunkel, d. h. schwarz, erscheinen. Daß wir dessenungeachtet durch unser Gesichtsorgan ein Urtheil über die äußere Gestalt dieser Körper gewinnen, kommt daher, daß sie von beleuchteten, also Licht zurückwerfenden Körpern umgeben sind. Gegen die gegebene Erklärung kann nicht eingewandt werden, daß es ja in unserer Macht stehe, einen und denselben Körper bald in dieser, bald in jener Farbe erscheinen zu lassen. Denn das Bemalen mit einem Farbestoffe oder Pigmente ist Nichts Anderes, als daß wir die Oberfläche eines Körpers dadurch unsichtbar machen, daß wir sie mit einem anderen undurchsichtigen Körper bedecken, welchem letzteren grade die Eigenschaft zukommt, daß er nur bestimmte Strahlen zurückwirft, also in unserem Auge die Empfindung einer bestimmten Farbe hervorruft. Bisher hatten wir angenommen, daß die Körper durch weißes Licht beleuchtet seien. Fällt aber nur *einfarbiges* Licht auf dieselben, so können sie auch nur dieses einfarbige Licht reflectiren, oder sie werden es absorbiren. Bei einer Beleuchtung durch einfarbiges Licht werden also alle Gegenstände entweder in der Farbe dieses Lichtes oder dunkel erscheinen (Beleuchtung durch bengalische Feuer). Nur die Helligkeit der verschiedenen Objecte wird verschieden sein, je nachdem sie einen größeren oder kleineren Antheil des auffallenden Lichtes zu reflectiren vermögen. Deßwegen erscheinen auch z. B. bei rother Beleuchtung diejenigen Objecte am hellsten, welche auch schon bei dem weißen Tageslichte roth gesehen werden.

Was nun die durchsichtigen Körper betrifft, so leuchtet wieder ein, daß ein solcher, wenn er das farblose Licht ganz ungeändert durch sich hindurchließe, auch selbst farblos erscheinen müßte, daß er aber, wenn er nur gewisse Bestandtheile desselben durchläßt, andere aber absorbirt, er stets

Digitized by Google

eine Farbe zeigen wird, welche je nach den durchgelassenen Bestandtheilen eine verschiedene sein muß.

§. 204. **Fraunhofer'sche Linien.** Läßt man in ein dunkles Zimmer durch eine sehr feine Spalte Sonnenstrahlen fallen, stellt ein Fernrohr in einer solchen Entfernung von der Spalte auf, daß man durch dasselbe den Spalt deutlich sieht, bringt dann vor das Fernrohr ein sehr reines Prisma mit vollkommen ebenen Wänden, dessen Kanten mit der Spalte parallel stehen, und dreht nun das Fernrohr mit dem Prisma so lange, bis man durch das Fernrohr das Farbenspectrum erblickt, so gewahrt man in demselben eine große Menge feiner dunklen Streifen, welche auf der Längenrichtung des Spectrums senkrecht stehen. Man kann einige dieser Streifen sogar mit bloßem Auge ohne Anwendung eines Fernrohrs sehen, wenn man ein Prisma anwendet, welches ein Spectrum von größerer Ausdehnung gibt, z. B. ein mit Schwefelkohlenstoff gefülltes Hohlprisma. Diese dunkeln Streifen im Spectrum sind im Jahre 1808 zuerst von Wollaston entdeckt worden. Ihre Lage hat 12 Jahre später Fraunhofer mit großer Genauigkeit bestimmt. Fraunhofer hat außerdem nachgewiesen, daß die Lage der verschiedenen Streifen, welche nach ihm die Fraunhofer'schen Linien genannt werden, sowohl von dem brechenden Winkel des Prisma's, als auch von der Natur der brechenden Substanz ganz unabhängig ist, ferner daß Licht von verschiedenen Quellen auch andere Erscheinungen zeigen. So nimmt man in dem von dem s. g. Drummond'schen Lichte erzeugten Spectrum die Fraunhofer'schen Linien nicht wahr, bei Anwendung von electrischem Lichte sieht man helle Streifen statt der dunklen, ebenso bei Anwendung von Lampenlicht.

Schon oben wurde gezeigt, daß das Licht nicht blos aus sieben verschieden brechbaren Bestandtheilen bestehe, sondern daß man wegen der gradlinigen Seitenbegrenzung der Spectren und des allmähligen Uebergangs der Farben in einander annehmen müsse, daß ihre Anzahl unendlich groß sei. Unser Versuch lehrt uns nun noch, daß dessenungeachtet das Sonnenlicht nicht Strahlen von jeder Brechbarkeit vom äußersten Roth bis zum äußersten Violett enthält, und daß demnach nicht durchaus ein stetiger Uebergang von einem Grade der Brechbarkeit zum nächstfolgenden stattfinde. Von den vielen Fraunhofer'schen Linien erscheinen namentlich sieben in den verschiedenen Theilen des Spectrums liegende sehr scharf und bestimmt. Diese pflegt man nach dem Vorgange Fraunhofer's mit den Buchstaben B, C, D, E, F, G und H zu bezeichnen, und hat dadurch den Vortheil gewonnen, daß durch dieselben für feinere Messungen das Spectrum in fest bestimmte Abtheilungen gebracht ist. Daß aber das Licht anderer selbstleuchtender Körper nicht dieselbe Erscheinung, wie das Sonnenlicht, bietet, lehrt uns, daß das Licht verschiedener Lichtquellen auch seiner Natur nach verschieden ist.

§. 205. **Chromatische Abweichung.** Man nehme eine Converlinse von etwas starker Krümmung und betrachte durch dieselbe z. B. die Buchstaben einer Druckschrift, oder man fange das durch diese Linse erzeugte Bild eines entfernten Gegenstandes auf einer mattgeschliffenen Glastafel auf, so wird man im ersteren Falle die Buchstaben, im letzteren das Bild auf der Glastafel mit farbigen Rändern umgeben erblicken.

Die Ursache dieser Erscheinung liegt wieder offenbar darin, daß die

verschiedenen farbigen Bestandtheile des Lichtes eine verschiedene Brechbarkeit besitzen.

Fig. 53.

Beim Durchgang durch die Linse werden die Strahlen, grade wie bei dem Durchgang durch ein Prisma, in ihre farbigen Bestandtheile zerlegt; von diesen müssen sich die violetten Strahlen v und v' (Fig. 53) wegen ihrer größeren Brechbarkeit hinter der Linse offenbar in einem der Linse näheren Punkte o vereinigen, als die rothen Strahlen r und r', welche erst in dem Punkte o' zusammentreffen. Dadurch wird aber bedingt, daß die verschiedenen, von den verschiedenfarbigen Strahlen erzeugten Bilder auch eine verschiedene Größe haben müssen, folglich sich nicht vollständig decken können, und die größeren über die kleineren hinausragen, wodurch sich die farbigen Ränder hinreichend erklären. Wenn wir zur Anstellung des Versuchs eine Converlinse von etwas starker Krümmung verlangt haben, so geschah dies nur deßwegen, weil bei diesen die Erscheinung deutlicher hervortritt, da die Strahlen desto weiter auseinander gebrochen werden, je größer die Krümmung ist, grade wie bei einem Prisma die Längenausdehnung des Spectrums desto größer wird, je größer der brechende Winkel desselben ist. Durch die farbigen Ränder können natürlich die erzeugten Bilder nicht scharf begrenzt erscheinen. Wir haben also bei unseren Linsen neben der sphärischen Abweichung hier noch einen zweiten Uebelstand, welcher die Deutlichkeit der Bilder beeinträchtigt. Man nennt ihn, da er durch die Farbenzerstreuung verursacht ist, die chromatische Abweichung (χρῶμα, Farbe).

§. 206. **Achromatische Prismen und Linsen.** Man nehme ein Prisma von Crownglas (dem gewöhnlichen Spiegelglas) und ein anderes von Flintglas (einem bleihaltigen Glase), beide mit gleichem brechenden Winkel, so wird man finden, daß ein durch das erstere erzeugtes Spectrum eine viel geringere Ausdehnung hat, als ein durch das letztere erzeugtes. Es geht daraus hervor, daß das Dispersionsvermögen des Flintglases viel bedeutender ist, als das des Crownglases, während nach angestellten Versuchen der Brechungsexponent beider Glassorten nicht sehr von einander abweicht. Man wird demnach ein Flintglasprisma mit kleinerem brechenden Winkel anfertigen können, welches ein ebenso großes Spectrum liefert, wie ein Crownglasprisma mit größerem brechenden Winkel.

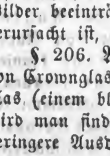


Fig. 54.

Hat man nun zwei solche Prismen A und B (Fig. 54), und verbindet sie so mit einander, wie in der Figur angedeutet ist, nämlich so, daß ihre brechenden Kanten nach entgegengesetzten Seiten gerichtet sind, dann ist offenbar die durch A bewirkte Farbendispersion der durch B bewirkten gleich, aber entgegengesetzt; es kann daher durch eine solche Combination keine Farbenzerstreuung stattfinden. Man nennt ein solches aus einem Crownglas- und einem Flintglasprisma zusammengesetztes Prisma, das die Farbenzerstreuung aufhebt, aber natürlich noch immer eine Brechung bewirkt, da wegen der ungleichen brechenden Winkel die Brechung durch das eine Prisma nicht der nach entgegengesetzter Richtung durch das andere

Digitized by Google

erfolgenden gleich ist, ein achromatisches Prisma. Ebenso kann man nun auch achromatische Linsen herstellen, indem man eine Converlinse von Crownglas mit einer Concavlinse von Flintglas combinirt, doch muß die Krümmung der ersteren stärker sein, als die der letzteren. Die Anfertigung achromatischer Linsen war wegen der Fernröhre für die Astronomie eine der wichtigsten Entdeckungen, welche wir Dollond verdanken, der sie im Jahre 1757 zuerst veröffentlichte. Eine Combination von Linsen, durch welche nicht nur die chromatische Abweichung, sondern zu gleicher Zeit auch die sphärische Abweichung aufgehoben wird, nennt man aplanatische (πλανάω ich führe irre), es kann hier jedoch auf das Nähere über dieselben nicht eingegangen werden.

Viertes Kapitel.

Vom Sehen mit unbewaffnetem Auge.

§. 207. **Das Auge.** Um sich eine richtige Vorstellung über den Act des Sehens zu bilden, ist es vor allen Dingen nöthig, sich eine nähere Kenntniß über unser Sehorgan zu verschaffen. Das Auge besteht aus dem Augapfel (bulbus oculi) und den ihn umgebenden Theilen. Der Augapfel liegt in der aus sieben Knochen gebildeten Augenhöhle (orbita), welche mit Beinhaut überzogen und mit weichem Fette ausgefüttert ist, um die Bewegung des Augapfels, welche durch sechs Muskeln nach allen Richtungen bewirkt werden kann, zu erleichtern. Zum Schutze des Auges vor allzu intensivem Lichte und vor einfallenden fremden Körpern dienen die etwas durchscheinenden Augenlieder (palbebrae) und die Augenwimpern. Der Augapfel selbst ist ein rundlicher Körper, von Außen begrenzt 1) durch die weiße undurchsichtige Hornhaut (tunica sclerotica) und 2) durch die durchsichtige Hornhaut (cornea), welche den vorderen Theil des Auges bedeckt, und stärker gekrümmt ist, als die weiße Haut. Nach Innen liegt über der undurchsichtigen Hornhaut die Aderhaut (tunica choroidea), welche mit einem braunschwarzen Pigmente bedeckt ist, um alle auf sie fallende Lichtstrahlen zu absorbiren, damit sie nicht durch Reflexion die Deutlichkeit der auf der folgenden Haut hervorzurufenden Bilder stören. Fast in der Mitte des Hintergrundes des Augapfels dringt der Sehnerv, welcher mit dem Gehirn in unmittelbarer Verbindung steht, durch die undurchsichtige Hornhaut schief in das Auge ein, und breitet sich als Netzhaut (retina) in den feinsten Verzweigungen über der Aderhaut aus. Außer den genannten Häuten, welche alle eine gekrümmte Oberfläche haben, ist im Innern des Auges noch eine ebene Haut, die Regenbogenhaut (iris), zu erwähnen. Sie schneidet gleichsam die Wölbung der durchsichtigen Hornhaut von den übrigen Theilen des Auges ab. Ihren Namen hat sie daher, daß sie bei verschiedenen Menschen verschieden gefärbt erscheint, grau, blau, braun, auch wohl grünlich, während ihre Hinterfläche mit demselben braunschwarzen Pigmente zu demselben Zwecke überzogen ist, wie die Aderhaut. Daraus, daß uns die Farbe der Iris sichtbar wird, geht hervor, daß nicht alle durch die durchsichtige Hornhaut einfallenden Strahlen bis zur Netzhaut gelangen, sondern ein Theil derselben schon an der Vorderfläche der Iris reflectirt wird. In

Digitized by Google

der Mitte der Regenbogenhaut befindet sich eine kreisförmige Oeffnung, die Pupille oder das Sehloch. Sie erscheint, von Vornen gesehen, schwarz (das Schwarze im Auge), und hat das Vermögen, sich, wenn allzu intensives Licht auf das Auge eindringt, zu verengern, dagegen bei schwachem Lichte sich zu erweitern. Hinter der Pupille liegt die Krystalllinse (lens crystallina), ein durchsichtiger, mehr fester, als flüssiger Körper, in eine häutige, sehr durchsichtige Kapsel eingeschlossen, und mit der Aderhaut durch die Strahlenbändchen zusammenhängend. Sie hat die Gestalt einer biconveren Linse, dabei ist ihre hintere Fläche stärker gekrümmt, als die vordere. Durch die Krystallinse wird das Auge in die Vorderkammer und Hinterkammer getheilt. Die erstere ist mit der wässerigen Flüssigkeit (humor aqueus) angefüllt, einer wasserähnlichen Flüssigkeit, in der letzteren befindet sich die Glasfeuchtigkeit (humor vitreus) oder der Glaskörper, eine ebenfalls sehr durchsichtige, gallertartige Substanz. Das Brechungsvermögen der wässerigen Feuchtigkeit, der Krystallinse und des Glaskörpers ist größer, als das des Wassers, wenn auch nicht bei allen dreien gleich, da es bei der wässerigen Feuchtigkeit am kleinsten, und bei der Krystallinse am größten ist.

§. 208. Das Sehen. Das Sehen oder die Empfindung von Licht und Farbe rührt von einem Reiz der Netzhaut her, der sich durch den Sehnerv bis zu dem Gehirn fortpflanzt, und hier zum Bewußtsein kommt, während eine vollkommne Ruhe der Netzhaut die Empfindung der Dunkelheit bedingt. Der Reiz der Netzhaut wird nun in der Regel durch die in das Auge eindringenden Lichtstrahlen hervorgebracht. Wir haben uns davon folgende Vorstellung zu machen. Von einem jeden Punkt eines hellen Gegenstandes dringt ein Bündel divergirender Strahlen durch die durchsichtige Hornhaut in das Innere des Auges. Von diesen werden, wie schon erwähnt, die äußeren auf der Regenbogenhaut reflectirt, und nur die inneren dringen durch die Pupille, und gelangen zur Netzhaut. Sie erleiden durch die durchsichtige Hornhaut, die wässerige Feuchtigkeit, die Krystallinse und den Glaskörper mehrfache Brechungen, und werden dadurch convergirend, so daß sie sich in irgend einem Punkte hinter dem Auge durchschneiden müssen, an welchem daher das Bild des strahlenden Punktes entsteht. Der Vereinigungspunkt kann vor, hinter, oder auf der Netzhaut liegen. In allen drei Fällen treffen die Strahlen auf die Netzhaut, da, selbst wenn der Punkt vor der Netzhaut liegt, die Strahlen nach ihrer Vereinigung wieder divergirend aus einander gehen. In allen drei Fällen wird also die Netzhaut durch die Strahlen afficirt, und wir werden sehen. Aber deutlich sehen wir den leuchtenden Punkt nur dann, wenn der Vereinigungspunkt der Strahlen auf der Netzhaut selbst liegt. Denn in den beiden anderen Fällen bilden die Strahlen auf der Netzhaut keinen Punkt, sondern eine kleine Fläche, und wir nehmen daher den leuchtenden Punkt nicht als Punkt, sondern als Fläche, d. i. undeutlich, wahr. Wie dies jetzt von einem Punkte des Objects nachgewiesen ist, so entstehen natürlich auch von allen übrigen Punkten desselben Bilder im Auge, welche zusammen ein Bild des ganzen Objects geben. Das Bild muß jedenfalls ein verkehrtes sein, weil die von den verschiedenen Punkten des Objects kommenden und ungebrochen durch das Auge hindurchgehenden Hauptstrahlen sich im Auge durchkreuzen müssen; auch ist die ganze Construction

Digitized by Google

des Auges einer complicirt zusammengesetzten Converlinse vergleichbar. Dringt sehr intensives Licht in das Auge, so können die Nerven der Netzhaut übereizt werden, woraus sich die Erfahrung erklärt, daß wir in einem solchen Falle vorübergehend fast gar Nichts sehen (geblendet sind). Ja durch einen allzu plötzlichen Uebergang von der Dunkelheit zum grellen Lichte kann sogar dauernde Blindheit hervorgerufen werden. Hieraus können wir auch den Vortheil ermessen, den uns das Vermögen der Pupille, sich erweitern und verengern zu können, gewährt.

Viele Menschen sind trotz des vorhandenen, und anscheinend unverletzten Sehorgans blind. Der abnorme Zustand, in welchem sich das Auge bei solchen Menschen befindet, ist ein zweifacher, nämlich entweder ist die Retina für alle Lichteindrücke unempfindlich geworden, oder die Krystallinse hat ihre Durchsichtigkeit verloren. Den ersten Zustand nennt man den schwarzen Staar, er ist unheilbar; der zweite heißt der graue Staar, und kann dadurch geheilt werden, daß man die Krystallinse entweder ganz herausnimmt, oder nur auf die Seite schiebt (den Staar stechen).

§. 209. **Warum sehen wir die Gegenstände aufrecht?** Es könnte auffallend erscheinen, daß wir die Gegenstände aufrecht sehen, obgleich ihr Bild auf der Netzhaut verkehrt ist. Allein es ist ja nicht das verkehrte Bild, das wir beim Sehen unmittelbar wahrnehmen, sondern unser Sehen wird bedingt durch die bei Entstehung des Bildes hervorgerufene Affection der Netzhaut. Worin diese Affection besteht, kann allerdings nicht mit voller Gewißheit nachgewiesen werden, doch können wir uns die Sache kaum anders denken, als daß sie gleichsam durch einen Stoß erfolge, der sich dann in seiner ursprünglichen Richtung in das Innere der Netzhaut fortpflanzt. Die von den unteren Punkten eines Gegenstandes kommenden Strahlen treffen nun die Netzhaut in einer nach Oben gehenden Richtung, und ebenso auch umgekehrt die von den oberen Punkten ausgehenden Strahlen in einer nach Unten gehenden Richtung. Nun sind wir aber gewohnt, die Ursache einer von uns wahrgenommenen Empfindung in der Richtung zu suchen, in welcher sie auf uns einwirkt, also in unserem Falle das als Unteres zu erkennen, was von Unten aus, und das als Oberes, was von Oben aus auf das Auge wirkt.

§. 210. **Das Sehen mit beiden Augen; Stereoscop.** 1) Hält man einen schmalen Gegenstand in einiger Entfernung vor das Auge, und sieht an ihm vorbei scharf nach einem weiter entfernten Gegenstande, so sieht man den schmalen Gegenstand doppelt, dagegen stets nur einfach, wenn man ihn selbst mit den Augen fixirt. 2) Wenn man nach einem Gegenstande hinsieht, den man einfach erblickt, und gibt dann durch einen Druck mit dem Finger dem einen Auge eine etwas andere Richtung, so erscheint der Gegenstand sofort doppelt. 3) Wenn man ein Blatt weißes Papier ansieht, und dann vor das eine Auge einen Schirm hält, der demselben einen Theil des Papieres bedeckt, so erscheint uns der Theil des Papieres, den wir mit beiden Augen sehen, heller, als der, den wir nur mit einem Auge sehen. 4) Von einem kleinen und nahen Würfel sieht man mit einem Auge nur drei Seitenflächen, mit zwei Augen dagegen auch noch eine vierte. 5) Man zeichne einen Gegenstand zweimal, einmal so, wie er vom rechten Auge, und dann noch einmal so, wie er von dem linken Auge

Digitized by Google

gesehen wird, nehme einen länglich viereckigen Rahmen von Holz, in dessen Mitte zwei ebene Spiegel unter einem rechten Winkel gegen einander geneigt stehen, die Glasfläche nach Außen gekehrt, dann bringe man den Spiegeln gegenüber auf den entsprechenden Seiten die beiden Zeichnungen in der Seitenwand des Rahmens an, und bringe ein Auge über jeden Spiegel, so gewahrt man statt der beiden Bilder einen körperlichen Gegenstand. Dies von Wheatstone erfundene Instrument führt den Namen Stereoscop (στερεὸν Körper, σκοπεῖν sehen).

Der erste und zweite Versuch lehren uns, daß wir einen Gegenstand mit beiden Augen doch nur einfach sehen, wenn wir die beiden Augenaxen auf denselben richten, daß wir ihn anderen Falls aber doppelt erblicken. Wenn aber die beiden Augenaxen zu gleicher Zeit auf denselben Gegenstand gerichtet sind, dann müssen offenbar die von demselben in den Augen entstehenden Bilder auf symmetrische Stellen der Netzhaut fallen. Nun sind aber nach den Ansichten bedeutender Physiologen beide Augen gleichsam nur zwei Zweige mit einfacher Wurzel, und jedes Theilchen der einfachen Wurzel ist gleichsam in zwei Zweige für beide Augen gespalten. Solche zusammengehörige Zweige des Sehnervs können nur an symmetrischen Stellen der beiden Netzhäute auslaufen. Erhalten daher solche symmetrische Stellen einen gleichen Lichteindruck, so kann der Erfolg wohl nur der sein, daß der Sehnerv in einem verstärkteren Grade afficirt wird, als wenn der Lichteindruck nur auf eine Netzhaut stattgefunden hätte. Damit beantwortet sich die Frage, warum wir in der Regel mit beiden Augen nur einfach sehen, zugleich erklärt sich daraus auch der dritte der obigen Versuche. Zum Verständniß des vierten und fünften Versuches erwäge man, daß für ferne Gegenstände die auf dieselben gerichteten Augenaxen als parallel angesehen werden können, woraus folgt, daß das perspectivische Bild eines solchen Gegenstandes in jedem Auge dasselbe wird, daß er also mit einem Auge gerade so gesehen wird, wie mit beiden. Bei nahen Gegenständen verhält sich die Sache anders; da können die auf den Gegenstand gerichteten Augenaxen nicht mehr als parallel angesehen werden. Das perspectivische Bild in dem einen Auge wird dadurch nothwendig ein anderes, als im anderen Auge. Das gleichzeitige Dasein zweier solcher verschiedenen Bilder aber macht, daß man ein Object mit drei Dimensionen wahrnimmt.

§. 211. **Accomodation des Auges; Weite des deutlichen Sehens; Kurzsichtigkeit und Weitsichtigkeit.** 1) Nach der Erfahrung können wir Gegenstände in verschiedener Entfernung gleich deutlich sehen. 2) Man halte etwa in 1 Fuß Entfernung von dem Auge eine Nadelspitze, und sehe über sie weg nach einem entfernten Gegenstande hin, so wird die Spitze unbestimmt erscheinen. Wenn wir dagegen das Auge auf die Spitze richten, so sehen wir den entfernten Gegenstand nur sehr undeutlich. 3) Bringt man einen Gegenstand ganz nahe vor das Auge, so wird er nie deutlich gesehen. 4) Man nehme ein Kartenblatt mit zwei feinen Nadelstichen, deren Abstand aber kleiner ist, als der Durchmesser der Pupille, halte es vor das eine Auge, und sehe nach einem ganz nahen Gegenstande, etwa einer Stecknadel, hin, so wird man diese doppelt erblicken. Rückt man dann den Gegenstand nach und nach in eine größere Entfernung, so wird man zu einer Entfernung gelangen, von welcher an der Gegenstand nur einfach

Digitized by Google

gesehen wird. 5) Wenn man die aus einem mattgeschliffenen Glase bestehende Rückwand einer kleinen camera obscura beweglich macht, so kann man es durch verschiedene Stellung der Rückwand dahin bringen, daß von demselben Gegenstande bald ein deutliches, bald ein undeutliches Bild auf dem mattgeschliffenen Glase entsteht. Das undeutliche Bild kann bekanntlich ebensowohl Folge der zu großen Nähe, als der zu großen Entfernung der Rückwand von der Linse sein. Läßt man im ersten Falle die Strahlen erst durch ein Concavglas, und im zweiten durch ein Converglas gehen, ehe sie in den Apparat gelangen, so sehen wir stets die entstehenden Bilder deutlicher werden. Einen solchen Apparat nennt man das optische Auge.

Oben bei den Converlinsen ist gezeigt worden, daß das durch eine solche Linse hervorgebrachte Bild je nach der Entfernung des Gegenstandes von der Linse eine verschiedene Lage hat. Das Auge wirkt, wie schon bemerkt, einer Converlinse ganz ähnlich. Man sollte demnach vermuthen, daß nur für Gegenstände von einer ganz bestimmten Entfernung auf der Netzhaut ein deutliches Bild entstehen könne. Die unter 1 mitgetheilte Erfahrung spricht dagegen. Wir müssen deßwegen dem Auge die Fähigkeit zuschreiben, sich nach der verschiedenen Entfernung der Gegenstände zu richten, und dadurch zu bewirken, daß es bald von einem nahen, bald von einem mehr entfernten Gegenstande ein deutliches Bild erzeugt. Dieser Fähigkeit hat man den Namen Accomodation (Anpassung des Auges zum deutlichen Sehen) gegeben. Fragt man, worin die Accomodation eigentlich bestehe, so läßt sich darauf bis jetzt keine bestimmte Antwort ertheilen. Erklären läßt sie sich aber durch die Annahmen, daß das Auge die Fähigkeit besitze, entweder die Entfernung der Netzhaut von der durchsichtigen Hornhaut, oder die Converität des Auges durch Zu- und Abnahme der Krümmung der Hornhaut nach Umständen zu verändern, oder daß die Krystallinse ihre Converität oder auch ihren Ort verändern könne. Möglich wäre auch, daß mehrere oder alle genannten Ursachen zu gleicher Zeit zusammenwirkten. Daß das Auge wirklich eine Veränderung erleidet, je nachdem es nach einem fernen oder nach einem nahen Gegenstande hinsieht, zeigt deutlich der zweite Versuch, sowie die weitere Erfahrung, daß es uns stets eine gewisse Anstrengung kostet, wenn wir schnell nach einander verschieden entfernte Gegenstände mit gleicher Deutlichkeit wahrzunehmen bemüht sind. Der dritte Versuch lehrt, daß die Accomodation wenigstens für nahe Gegenstände ihre Grenze hat. Man hat gefunden, daß die Entfernung, bis zu welcher die Accomodation reicht, oder, mit anderen Worten, bis zu welcher man nahe Gegenstände deutlich sehen kann, bei einem gesunden Auge 8 bis 10 Zoll beträgt, und hat diese Entfernung die Weite des deutlichen Sehens oder die Sehweite genannt. Ist ein Gegenstand dem Auge näher, so sind die von einem Punkte desselben nach dem Auge gelangenden Strahlen zu divergent, als daß sie durch die von den verschiedenen Bestandtheilen des Auges bewirkten Brechungen dahin gebracht werden könnten, daß sie sich auf der Netzhaut wieder vereinigten. Ihr Vereinigungspunkt liegt erst hinter der Netzhaut, diese wird also durch die Strahlen in einer kleinen Fläche, und nicht in einem Punkte afficirt. Ebenso ist es mit den von den übrigen Punkten ausgehenden Strahlen, deßhalb fallen die Bilder verschiedener Punkte theilweise in einander, wodurch die Undeutlichkeit hervorgerufen wird. Im

Digitized by Google

vierten Versuch können nur zwei ganz feine Strahlenbündel durch die beiden feinen Oeffnungen in das Auge gelangen. Die zugehörigen Strahlen vereinigen sich zwar auch erst hinter der Netzhaut, aber sie bilden auf der Netzhaut keine kreisförmige Fläche, wie es ohne Anwendung des Kartenblattes der Fall sein würde, sondern treffen die Netzhaut nur in 2 abgesonderten Punkten dieser kreisförmigen Fläche, da die übrigen Strahlen, die sonst auf das Auge fallen würden, durch das Kartenblatt abgehalten werden. Wird der Gegenstand nun etwas weiter von dem Auge entfernt, dann vereinigen sich die Strahlen, wenn auch noch immer hinter der Netzhaut, doch näher bei derselben; dadurch rücken auch die 2 getroffenen Stellen der Netzhaut näher zusammen, bis endlich in der Weite des deutlichen Sehens die Vereinigung der Strahlen auf der Netzhaut selbst in einem einzigen Punkte stattfindet, und ein Einfachsehen verursacht.

Manche Augen haben ihr Accomodationsvermögen, wenigstens theilweise, verloren. Die Augen, welche das Accomodationsvermögen für ferne Gegenstände verloren haben, nennt man kurzsichtig (myops), diejenigen dagegen, welche sich nicht mehr für nahe Gegenstände accomodiren können, fern- oder weitsichtig (presbys). Kurzsichtige Augen sehen demnach in der Nähe gut, in der Ferne schlecht, weitsichtige umgekehrt. Bei den ersteren vereinigen sich die von einem fernen Punkte kommenden Strahlen schon vor der Netzhaut, bei den letzteren die von einem nahen Punkte ausgehenden Strahlen erst hinter der Netzhaut, die ersteren brechen demnach die Strahlen zu stark, die letzteren zu wenig. Der Grund für beide abnorme Zustände des Auges kann in dem Auge selbst liegen. So muß offenbar die Kurzsichtigkeit dadurch entstehen, daß entweder die durchsichtige Hornhaut, oder die Krystalllinse, oder beide zugleich zu stark gekrümmt sind. Die Weitsichtigkeit, welche wir sehr häufig bei älteren Personen wahrnehmen, bei denen die Säfte des Körpers sich zu vermindern anfangen, hat wahrscheinlich ihren Grund in einer Abnahme der Feuchtigkeiten des Auges, und einer dadurch bedingten geringeren Convexität der Hornhaut und der Krystalllinse. Die Weitsichtigkeit nimmt deßhalb mit dem Alter immer mehr zu, während die Kurzsichtigkeit sich öfter mit zunehmendem Alter nach und nach verliert. Die Ursache ist in beiden Fällen aber oft auch eine äußere, durch Gewöhnung erzeugte. Wer fast immer nur nach nahen Gegenständen hinsieht, wie diejenigen, welche mit Lesen eines feinen Drucks und Schreiben beschäftigt sind, und sich gewöhnt haben, das Gesicht zu nahe über das Papier zu halten, wird kurzsichtig; Landleute und Jäger dagegen, welche fast nur in die Ferne sehen, sind gewöhnlich weitsichtig. In einem, wie in dem anderen Falle ist dann der Mangel an Uebung der Grund, warum nach und nach das Accomodationsvermögen verloren geht. Da das kurzsichtige Auge nur die von nahen Gegenständen kommenden, also divergenteren Strahlen, auf der Netzhaut wirklich vereinigt, so läßt sich dem Fehler der Kurzsichtigkeit dadurch abhelfen, daß man die von fernen Gegenständen kommenden Strahlen, indem man sie durch ein Concavglas gehen läßt, erst divergenter macht, ehe sie zu dem Auge gelangen. Das weitsichtige Auge vereinigt nur die weniger divergenten, von fernen Gegenständen kommenden Strahlen auf der Netzhaut; wenn man demnach die zu divergenten Strahlen naher Gegenstände erst durch ein Conveglas mehr zusammenbricht, ehe sie in das Auge gelangen, so kann man

Digitized by Google

dadurch bewirken, daß auch sie sich auf der Netzhaut vereinigen, d. h. daß man auch die nahen Gegenstände deutlich sieht. Hierauf beruht der Nutzen der Brillen, deren Wirkungsweise durch den fünften Versuch, der durch das Gesagte wohl hinlänglich seine Erklärung gefunden hat, experimentell veranschaulicht wird. Ein fortwährender Gebrauch der Brillen hat freilich den Nachtheil, daß das Auge nicht mehr in der Accomodation geübt wird, und so nach und nach immer mehr die Fähigkeit dazu verliert.

§. 212. **Optische Täuschungen; Augenmaß.** 1) Sonne und Mond erscheinen uns bei ihrem Auf- und Untergang viel größer, als wenn sie hoch über dem Horizonte stehen. 2) Im Nebel erscheinen uns nahe Berge höher, als bei heiterem Wetter. 3) Das Himmelsgewölbe erscheint uns nicht halbkugelförmig, sondern oben eingedrückt. 4) Wenn wir am Anfange einer von parallelen Baumreihen gebildeten langen Allee stehen, so scheint diese gegen das andere Ende hin immer enger zu werden. 5) Eine weit entfernte Pyramide erscheint uns als Kegel, ein regelmäßiges Vieleck, aus einiger Entfernung gesehen, als Kreis. 6) Sieht man von einer Brücke längere Zeit in fließendes Wasser hinab, so scheint die Brücke stromaufwärts zu gehen; einem in einem Eisenbahnwagen Fahrenden scheinen die äußeren Gegenstände in schneller Bewegung begriffen.

Von der Unrichtigkeit aller der angeführten und vieler ähnlichen Wahrnehmungen sind wir fest überzeugt, dessenungeachtet drängen sie sich, so oft wir Gelegenheit haben, sie zu machen, immer wieder von Neuem auf. Man sieht aus den gegebenen Beispielen, daß wir durch unseren Gesichtssinn in unserem Urtheile über Größe, Entfernung, Gestalt und Bewegung äußerer Gegenstände irre geführt werden können, und umfaßt solche falsche Wahrnehmungen unter dem Namen der optischen Täuschungen. Es entsteht nun die Frage, wodurch diese optischen Täuschungen hervorgerufen werden. Nach Versuchen, welche an Menschen- und an Thieraugen angestellt wurden, durchschneiden sich alle graden Linien, welche man von den Punkten eines äußeren Gegenstandes nach den entsprechenden Punkten des Bildes auf der Netzhaut gezogen denkt, im Innern des Auges hinter der Krystalllinse in einem und demselben Punkte. Man nennt diesen Punkt den Kreuzungspunkt, und die graden Linien Richtungslinien, den Winkel, welchen diese letzteren am Kreuzungspunkte bilden, den Gesichtswinkel. Nach der Größe des Gesichtswinkels, welchen die äußersten Punkte eines gesehenen Gegenstandes bilden, beurtheilen wir hauptsächlich die Größe des Gegenstandes, da offenbar dieser Winkel unter sonst gleichen Umständen desto größer wird, je weiter diese äußersten Punkte aus einander liegen. Aber die Größe dieses Winkels hängt nicht allein von der Größe des Gegenstandes, sondern auch ebenso sehr von der Entfernung desselben von dem Auge ab, und muß für denselben Gegenstand offenbar um so kleiner werden, je größer die Entfernung dieses letzteren ist. Hieraus geht hervor, daß wir ein richtiges Urtheil über die Größe eines Gegenstandes nur dann fällen können, wenn wir zugleich eine richtige Vorstellung über seine Entfernung besitzen. Irren wir demnach in der letzteren, so ist damit nothwendig eine Täuschung in Beziehung auf erstere verbunden. Auf unser Urtheil über die Entfernung eines Gegenstandes haben Einfluß: 1) der Winkel, welchen die beiden Augenaxen mit einander machen, wenn wir unsere beiden Augen nach einem Punkte des Gegenstandes hinrichten. Je

Digitized by Google

näher der Punkt ist, desto größer wird dieser Winkel, desto größer wird aber auch die Anstrengung der Muskeln, die nöthige Bewegung der Augen hervorzubringen. Die Verschiedenheit der Anstrengung bringt aber in uns verschiedene Empfindungen hervor. 2) Die Stärke der Beleuchtung, da erfahrungsmäßig diese desto mehr abnimmt, je größer die Entfernung wird. 3) Die Menge der zwischen dem Gegenstande und uns befindlichen Objecte, da wir nothwendig schließen müssen, daß die Entfernung desto größer sein müsse, je mehr solcher Objecte wir erblicken. 4) Die scheinbare Größe des Gegenstandes, wenn uns zugleich seine absolute Größe bekannt ist. 5) Seine Lage gegen Objecte von bekannter Entfernung. In der Beurtheilung naher Gegenstände gehen wir selten irre, weil sich bei ihnen unser Urtheil auf fast alle erwähnten Punkte zugleich stützen kann. Anders ist dies aber bei fernen Gegenständen, wo uns oft nur der eine oder der andere Stützpunkt übrig bleibt. Irren wir uns dann in diesen, so ist dadurch eine Täuschung in Beziehung auf die Entfernung bedingt. Unser Urtheil über die Größe und die Entfernung der Gegenstände nennen wir das Augenmaß.

Sollen wir uns eine richtige Vorstellung über die Gestalt eines Gegenstandes machen, so darf das von ihm auf der Netzhaut erzeugte Bild nicht zu klein sein, weil sonst die einzelnen Theile desselben nicht scharf getrennt auftreten können. Die Erfahrung lehrt nun, daß wir in der Regel die wahre Gestalt eines Gegenstandes nicht mehr beurtheilen können, wenn der Gesichtswinkel, unter welchem wir ihn erblicken, kleiner, als $\frac{1}{2}$ Minute, ist. Doch hat hierauf auch die Stärke des von dem Körper ausgehenden Lichtes im Verhältniß zur Beleuchtung seiner Umgebung Einfluß (Fixsterne).

Was endlich unser Urtheil über die Bewegung eines gesehenen Gegenstandes betrifft, so stützt sich dieses darauf, daß wir uns einer Bewegung seines Bildes auf der Netzhaut bewußt werden. Eine Bewegung des Netzhautbildes kann aber nicht nur durch eine Bewegung des Körpers selbst, sondern auch, während der gesehene Körper selbst in Ruhe verharrt, durch eine Bewegung des Auges hervorgebracht werden.

Aus dem Mitgetheilten geht die Möglichkeit optischer Täuschungen in den oben angeführten Beziehungen hervor, und werden sich die meisten derselben hinreichend erklären lassen.

§. 213. Irradiation. 1) In einer hellen, heiteren Nacht kurz vor oder nach dem Neumonde, in welcher wir neben dem erleuchteten Theile des Mondes auch noch den übrigen dunkeln Körper desselben unterscheiden können, erscheint uns die Mondsichel als Theil einer größeren Kugel, als zu welcher der dunkle Theil des Mondes gehört. 2) Auf einem weißen Bogen Papier erscheint ein Streifen schwarzes Papier schmäler, als ein gleich breiter Streifen weißes Papier auf schwarzem Papier. Dieser Versuch läßt sich auf folgende Weise sehr schön anstellen. Man nehme ein Quartblatt Papier, schwärze die eine Hälfte durch Tusche, während die andere weiß bleibt, und theile die weiße Hälfte durch einen schmalen schwarzen Streifen von etwa 2 Linien Breite, die schwarze Hälfte durch einen ebenso breiten weißen Streifen, so daß der weiße Streifen in der Verlängerung des schwarzen liegt. Wenn man nun auf Zimmerlänge nach dem Blatte hinsieht, so wird stets der weiße Streifen breiter erscheinen,

Digitized by Google

als der schwarze. 3) Lebhaft glühende Drähte erscheinen viel dicker, als sie wirklich sind.

Diese und ähnliche Erscheinungen erklären sich durch die Annahme, daß durch das Licht nicht nur die unmittelbar getroffenen Stellen der Netzhaut afficirt werden, sondern daß auch die ihnen zunächst liegenden Stellen noch eine Einwirkung erleiden. Die Annahme hat um so mehr Wahrscheinlichkeit für sich, als wir uns die Einwirkung des Lichtes, wie schon früher bemerkt, einem Stoße ähnlich, und die Netzhaut als eine elastische Fläche denken müssen. Ein Stoß auf eine elastische Fläche bringt aber bekanntlich ringsum die getroffene Stelle noch eine Einbiegung hervor. Den eben beschriebenen Hergang nennt man die Irradiation (irradiare, hineinstrahlen).

§. 214. **Dauer des Lichteindrucks; Thaumatrop, stroboscopische Scheiben.** 1) Eine abgeschossene Flintenkugel können wir nicht sehen. 2) Wenn wir eine glühende Kohle rasch in einem Kreise umschwingen, so kann man die Kohle selbst nicht mehr unterscheiden, sondern man gewahrt nur einen feurigen Ring. 3) Zeichnet man auf die eine Seite einer Pappscheibe einen Theil einer Figur, und auf die andere an den entsprechenden Stellen die Ergänzung derselben, z. B. auf der einen Seite einen Käfig, und auf der anderen einen Vogel, und dreht man dann die Scheibe schnell um sich selbst vermittelst zweier daran befestigten Fäden, so erscheint die Figur als ein Ganzes, in unserem Falle ein Vogel im Käfig. Eine solche Vorrichtung nennt man ein Thaumatrop (Wunderdreher, θαῦμα, Wunder und τρέπειν, wenden, drehen). 4) Man nehme Pappscheiben, auf deren einer Seite derselbe Gegenstand in 8 bis 10 auf einander folgenden Stellungen abgebildet ist, z. B. eine Maschine in den verschiedenen Stellungen ihres Ganges. Diese befestige man auf einer etwas größeren Pappscheibe, welche sich um eine horizontale Axe drehen läßt, und an deren Rande sich in gleichen Abständen ebenso viele Oeffnungen befinden, als Abbildungen auf der kleineren Scheibe. Dann sehe man durch eine der Oeffnungen nach einem Planspiegel, dem auch die bemalte Seite der kleineren, daran befestigten Scheibe zugekehrt sein muß, und setze die Scheibe in eine schnelle drehende Bewegung, so daß an dem Auge die Oeffnungen in rascher Aufeinanderfolge vorüberkommen, so sieht man den abgebildeten Gegenstand in Bewegung. Solche Scheiben sind zuerst von Stampfer in Wien erfunden und von ihm stroboscopische Scheiben (optische Drehscheiben, στρέφειν, drehen und σκοπεῖν, sehen) genannt worden.

Daß wir eine abgeschossene Flintenkugel nicht sehen, dafür läßt sich kein anderer Grund auffinden, als ihre allzu rasche Bewegung. Der Eindruck, den sie in Folge davon auf unserer Netzhaut hervorbringt, ist zu schnell vorübergehend, und kommt aus dieser Ursache nicht zum Bewußtsein. Die 3 übrigen Versuche dagegen erklären sich durch die Annahme, daß ein einmal von dem Lichte auf die Netzhaut hervorgebrachter Eindruck noch eine kurze Zeit andauert, wenn auch die ihn erzeugende Ursache zu wirken aufgehört hat. Denn bei rascher Drehung, welche bei unseren Versuchen nothwendige Bedingung ist, werden dann auf derselben Stelle der Netzhaut neue Lichteindrücke hervorgerufen, ehe vorangegangene verschwunden sind. Die Andauer beträgt nach angestellten Versuchen im Mittel etwa $\frac{1}{3}$ Secunde, ist jedoch unter sonst gleichen Umständen nach den Farben

Digitized by Google

wegen ihrer verſchiedenen Intenſität verſchieden, ſie iſt am größten für weißes Licht, dann folgen in abſteigender Stufenfolge gelbes, rothes, blaues Licht. Wir ſehen demnach, daß ein Lichteindruck ebenſowohl zu ſeiner vollſtändigen Entwickelung, wie auch zu ſeinem völligen Verſchwinden Zeit nöthig hat.

§. 215. **Subjective Farbenerſcheinungen; Diploſcop.** 1) Wenn wir aus dem hellen Tageslicht plötzlich in das Dunkele kommen, ſo können wir keine Gegenſtände von einander unterſcheiden. Bleiben wir aber eine Zeit lang im Dunkeln, dann werden wir nach und nach die Umriſſe der uns umgebenden Gegenſtände gewahr. 2) Wenn man das Auge auf eine ſchwarze Kreisfläche richtet, welche auf weißem Grunde liegt, ſo wird uns bald die umgebende weiße Fläche unmittelbar um den ſchwarzen Kreis herum weißer, glänzender erſcheinen, als in größerer Entfernung von demſelben. Wenn man dagegen eine weiße Kreisfläche, welche auf grauem Grunde liegt, ſcharf mit den Augen fixirt, ſo erſcheint das die Kreisfläche unmittelbar umgebende Grau dunkler, als da, wo es weiter von der Kreisfläche abliegt. 3) Legt man eine lebhaft roth gefärbte Kreisfläche auf einen Bogen weißes Papier, ſieht eine Zeit lang angeſtrengt darnach, und ſchnellt dann mit dem Finger die rothe Kreisfläche raſch weg, ſo gewahrt man an der Stelle, wo ſie gelegen, für eine kurze Zeit ein hellgrünes Bild derſelben. Wendet man einen anders gefärbten Kreis an, ſo ändert auch das Bild ſeine Farbe, indem es immer die complementäre Farbe der urſprünglichen zeigt. 4) Hat man eine Scheibe, welche halb roth, und halb grün gefärbt iſt, und ſich raſch um eine horizontale Are drehen läßt, und 2 inwendig geſchwärzte Röhren, ſieht man nun eine Zeit lang mit dem einen Auge angeſtrengt durch die eine Röhre nur nach der rothen Hälfte, und mit dem anderen Auge durch die andere Röhre nur nach der grünen Hälfte, und wird dann die Scheibe plötzlich in Rotation verſetzt, ſo ſieht man in dem erſten Momente da, wo Roth geweſen iſt, Grün, und da, wo Grün geweſen iſt, Roth. Ein ſolcher Apparat heißt Diploſcop (διπλόος, doppelt, σκοπεῖν, ſehen). 5) Auf einer Scheibe werden auf ſchwarzem Grunde zwiſchen 2 concentriſchen Kreiſen, die mit der Scheibe einen gemeinſchaftlichen Mittelpunkt haben, Kreiſe gezeichnet, deren Durchmeſſer dem Abſtande der concentriſchen Kreislinien gleich iſt, und welche, indem ſie die concentriſchen Kreiſe und ſich ſelbſt berühren, einen zuſammenhängenden Ring bilden. Dieſe Kreiſe ſeien abwechſelnd roth und weiß. Wird nun die Scheibe in ſchnelle Drehung verſetzt, ſo ſtellt ſich das Ganze als ein blaßroth gefärbter Ring dar. Sowie aber die Drehung nachläßt, ſieht man alle weißen Kreiſe grün gefärbt. Es iſt dies ein von Profeſſor Dove angegebener Verſuch. 6) Im verdunkelten Zimmer ſtelle man vor das Rumford'ſche Photometer (§. 175) 2 Lichter auf, und bringe vor das eine Licht ein rothes Glas; die beiden Schatten werden dann complementär gefärbt erſcheinen, der nämlich, welcher nur durch Strahlen erleuchtet wird, die durch das rothe Glas gegangen ſind, roth, der andere dagegen, welcher nur durch weißes Licht erleuchtet wird, grün. Dagegen verſchwindet die Farbe des letzteren Schattens, wenn man nach demſelben durch eine innen geſchwärzte Röhre ſieht.

Aus der erſten Erfahrung lernen wir, daß das Auge, wenn es eine Zeit lang durch ſtarkes intenſives Licht gereizt worden iſt, für ſchwächere

Digitized by Google

Lichteindrücke unempfindlich, abgestumpft wird. Durch ein längeres Verweilen im dunkeln Raume erholt es sich gleichsam wieder, und gewinnt seine gewohnte Empfindlichkeit auch für schwächere Lichteindrücke. Der zweite Versuch zeigt dann in seinem zweiten Theile, daß das, was so eben von dem ganzen Auge gesagt wurde, auch auf einzelne Theile der Netzhaut Anwendung findet; denn wie man von dem weißen Kreise wegsieht, um die Umgebung gewahr zu werden, kommen an die Stelle der Netzhaut, welche vorher von den Strahlen der weißen Fläche getroffen wurde, jetzt die von der nächsten Umgebung ausgehenden Strahlen. Aus dem ersten Theil geht zugleich hervor, daß diejenigen Stellen der Netzhaut, welche eine Zeit lang Ruhe genossen, indem wenig oder gar kein Licht auf sie fiel, dadurch für den Eindruck des Lichtes desto empfindlicher werden, denn wir sehen ja, wenn wir den schwarzen Kreis unverwandt betrachtet haben, und dann nach der Umgebung hinsehen, die nächste Umgebung, von welcher jetzt die Strahlen nach der Stelle der Netzhaut hinfallen, wo das Bild des schwarzen Kreises war, heller, als die fernere, da diese ihre Strahlen an solche Stellen sendet, wo schon vorher Lichtstrahlen hingefallen waren. Die übrigen Versuche zeigen dann noch specieller, daß, wenn das Auge oder nur ein Theil der Netzhaut vorzugsweise von einer bestimmten Strahlengattung, z. B. von Strahlen rothen Lichts, gereizt worden ist, es dadurch hauptsächlich für diese bestimmte Farbe unempfindlich gemacht wird, und dann von dem weißen Lichte nur noch diejenige Einwirkung erleidet, welche übrig bleibt, wenn wir uns aus dem weißen Lichte jene Farbe wegdenken. Denn wenn dann an solche Stellen der Netzhaut weißes Licht hinfällt, so kann es nicht als weißes Licht empfunden werden, sondern als Licht von der complementären Farbe. Wenn in dem dritten Versuche erwähnt ist, daß das complementär gefärbte Nachbild hellfarbig erscheine, so hat das seinen Grund darin, daß die Ergänzungsfarbe noch mit vielem Weiß gemischt ist. Es ist dies auch die Ursache, warum im fünften Versuch bei schneller Drehung ein blaßrother Ring gesehen wird. Bei Anstellung des fünften Versuchs zeigt sich auch noch eine merkwürdige optische Täuschung. Sobald wir bei nachlassender Rotationsgeschwindigkeit die Kreise abwechselnd roth und grün erblicken, erscheinen sie auch nicht mehr als Kreise, sondern als schmale Ellipsen, deren Längenaxen dem Drehungsmittelpunkt zugekehrt sind. Der Grund ist nach Dove der, daß man auf dem gegebenen Raume mehr Kreise zu sehen glaubt, als in der Wirklichkeit vorhanden sind. Im sechsten Versuch wird die grüne Färbung des Schattens nicht wahrgenommen, wenn man durch ein geschwärztes Rohr sieht, weil durch dasselbe das Auge vor dem Eindruck der herrschenden Farbe bewahrt wird.

Da bei den erwähnten Erscheinungen ein Auge Farben an einer Stelle sieht, wo ein anderes Auge, das nicht denselben Affectionen unterworfen war, sie nicht sieht, so nennt man solche Farbenerscheinungen subjective Farbenerscheinungen, oder, insofern sie durch eine vorangegangene Affection unseres Gesichtsorgans bedingt sind, auch physiologische.

Fünftes Kapitel.

Das Sehen mit bewaffnetem Auge.

§. 216. **Mikroscop und Telescop.** Es ist schon früher bemerkt, daß, wenn ein Gegenstand deutlich von uns gesehen werden soll, sein Gesichtswinkel nicht zu klein sein darf. Die Größe des Gesichtswinkels hängt aber eines Theils von der Größe des Gegenstandes, und anderen Theils von seiner Entfernung vom Auge ab. Ein Gegenstand kann also sowohl zu klein, als auch zu weit entfernt sein, als daß wir ihn deutlich wahrnehmen könnten. In diesen Fällen bedienen wir uns optischer Instrumente, deren Zweck es ist, den Gesichtswinkel der Gegenstände zu vergrößern, und uns so die Gegenstände größer und dadurch auch deutlicher darzustellen. Dient das Instrument zum deutlichen Sehen sehr kleiner naher Körper, indem es vergrößerte Bilder derselben hervorruft, so heißt es ein Mikroscop (μικρός klein, σκοπειν sehen). Hat es aber den Zweck, uns ferne Gegenstände größer und deutlicher sehen zu lassen, so nennt man es ein Fernrohr oder Telescop (τέλος Ende, σκοπειν sehen).

§. 217. **Das einfache Mikroscop, Lupen.** Die Mikroscope theilt man ein in einfache und zusammengesetzte. Während die ersteren nur aus einer einzigen Linse bestehen, sind die letzteren eine Verbindung von mehreren Linsen oder von Spiegeln und Linsen. Nach §. 211 muß ein naher Gegenstand doch noch um die Sehweite von dem Auge entfernt sein, wenn wir ihn deutlich sehen sollen. In der Entfernung von 8 bis 10 Zoll ist aber der optische Winkel sehr kleiner Gegenstände schon zu klein. Er wird freilich größer, wenn man den Gegenstand dem Auge noch näher bringt, aber dann sind die auf das Auge fallenden Strahlen zu divergent, als daß die von einem Punkte ausgehenden sich auch in einem Punkte der Netzhaut wieder vereinigen könnten, ihre Vereinigung findet erst hinter der Netzhaut statt. Indem man also eine Ursache des undeutlichen Sehens aufhebt, ruft man eine neue hervor. Soll auch diese wieder aufgehoben werden, so kann dies nur dadurch geschehen, daß man die Divergenz der Strahlen, ehe dieselben zu dem Auge gelangen, vermindert. Dieser Zweck wird aber bekanntlich dadurch erreicht, daß man zwischen das Object und unser Auge eine Converlinse bringt. In §. 195 ist gezeigt, daß, wenn ein Object innerhalb der Brennweite einer Converlinse sich befindet, und wir durch die Linse nach ihm hinsehen, wir ein aufrechtes, vergrößertes und weiter abstehendes Bild desselben erblicken. Da aber der Ort des Bildes wenigstens um die Sehweite von dem Auge entfernt sein muß, so wird man zu unserem Zwecke nicht jede Converlinse gleich gut gebrauchen können, sondern vorzugsweise nur solche von geringer Brennweite, von einer Brennweite, welche viel kleiner ist, als die Weite des deutlichen Sehens. Solche Converlinsen nennt man dann einfache Mikroscope und diejenigen derselben, deren Brennweite noch bis zu einigen Zollen und wenigstens ½ Zoll beträgt, heißen auch Lupen. In den meisten Fällen, nämlich jedes Mal, wenn der Durchmesser der Linse größer ist, als der Durchmesser der Pupille, gewähren solche Linsen außer der Vergrößerung auch noch den Vortheil, daß durch sie von jedem Punkte des Objectes mehr Lichtstrahlen durch die Pupille gelangen, als ohne Anwendung der

Digitized by Google

Linse der Fall sein würde. Da bei Kurzsichtigen die Weite des deutlichen Sehens kleiner, und bei Weitsichtigen größer ist, als bei einem normalen Auge, und da nach §. 195 das Bild der Linse näher kommt, wenn der innerhalb der Brennweite befindliche Gegenstand der Linse näher ist, so erklärt sich, warum ein kurzsichtiges Auge den Gegenstand näher an die Linse bringen müsse, als ein weitsichtiges. Um den Werth eines einfachen Mikroscopes beurtheilen zu können, muß man im Stande sein zu bestimmen, eine wievielfache Vergrößerung es hervorruft. Man unterscheidet die lineare Vergrößerung von der Vergrößerung der Fläche. Aus der ersteren berechnet sich aber die letztere ganz leicht, indem man nur die gefundene Zahl mit sich selbst zu multipliciren hat. Daß man unter der linearen Vergrößerung aber die Zahl versteht, welche man erhält, wenn man irgend eine lineare Ausdehnung des Bildes durch die entsprechende des Objects dividirt, bedarf keiner weiteren Erklärung.

Fig. 55.

Nun sei c (Fig. 55) der optische Mittelpunkt der Linse, ab die Längenausdehnung des Objects, AB die entsprechende des Bildes. Wenn das Bild deutlich wahrgenommen werden soll, muß es sich, wie schon bemerkt, in der Sehweite befinden, es sei also cD die Sehweite. Das Object ab muß innerhalb der Brennweite sein, und da diese nur klein ist, so kann man bei nicht ganz genauen Bestimmungen, cd gleich der Brennweite setzen. Nun ist ab : AB = ca : cA = cd : cD oder $\frac{AB}{ab} = \frac{cD}{cd}$, d. h. die lineare Vergrößerung eines einfachen Mikroscopes wird gefunden, wenn man die Sehweite durch die Brennweite desselben dividirt. Zu genaueren Bestimmungen dient die in §. 195 entwickelte Formel. Es war nämlich $\frac{1}{f} = \frac{1}{d} + \frac{1}{\delta}$. Bei der Herleitung der Formel war angenommen, daß Gegenstand und Bild auf verschiedenen Seiten der Linse lagen; da sie aber bei dem einfachen Mikroscope auf derselben Seite der Linse liegen, so muß jetzt δ negativ gesetzt werden, und es ist für unseren Fall $\frac{1}{f} = \frac{1}{d} - \frac{1}{\delta}$, $\frac{\delta}{f} = \frac{\delta}{d} - 1$ und $\frac{\delta}{f} + 1 = \frac{\delta}{d}$. Nun ist δ = cD oder der Weite des deutlichen Sehens, d = cd, und da nach Obigem $\frac{cD}{cd} = \frac{AB}{ab}$ war, so ist auch $\frac{\delta}{d} = \frac{AB}{ab} = \frac{\delta}{f} + 1$, d. h. die lineare Vergrößerung wird gefunden, wenn man den Quotienten aus der Weite des deutlichen Sehens durch die Brennweite der Linse um 1 vermehrt. Da nun $\frac{\delta}{f}$ desto größer wird, je kleiner f ist, so geht daraus hervor, daß die Vergrößerung wächst, je kleiner die Brennweite der Linse wird. Je kleiner aber die Brennweite, oder, was dasselbe ist, je stärker die Krümmung, desto kleiner wird die Linse selbst. Durch eine kleine Linse kann man offenbar aber auch nur einen kleinen Raum übersehen. Das Gesichtsfeld einer Linse wird

Digitized by Google

also desto kleiner, je mehr die Linse vergrößert. Dabei tritt auch noch der Nachtheil ein, daß eine Linse, je kleiner sie ist, desto weniger Licht von einem Punkte des Objects nach dem Auge gelangen läßt, und daß dadurch die mehr vergrößerten Bilder eine geringere Helligkeit besitzen. Wegen dieses Uebelstandes ist man darauf gekommen, statt einer einzigen, stark gekrümmten Converlinse deren zwei, die sich in einer geschwärzten Röhre sehr nahe hinter einander befinden, weniger gekrümmt sind, und dadurch einen größeren Durchmesser haben können, anzuwenden. Wegen des größeren Durchmessers werden sie eine größere Helligkeit gewähren, und die Verbindung von zweien wird es möglich machen, eine ebenso große Vergrößerung hervorzubringen, wie durch eine viel stärker gekrümmte Linse, denn das vergrößerte Bild, welches die erste liefert, wird durch die zweite nochmals vergrößert. Auch solche Verbindungen von zwei Linsen rechnet man gewöhnlich noch zu den einfachen Mikroscopen oder Lupen.

§. 218. **Das zusammengesetzte Mikroscop.** Das zusammengesetzte Mikroscop besteht in seiner einfachsten Gestalt aus zwei Converlinsen, von welchen diejenige, welche dem zu betrachtenden Objecte zugewandt wird, das Objectivglas, oder auch nur das Objectiv, und diejenige, durch welche das Auge beim Gebrauche sieht, das Ocularglas (oculus Auge) oder das Ocular heißt. Das Objectiv hat gewöhnlich eine sehr kleine Brennweite, während die Brennweite des Oculars bedeutend größer ist.

Fig. 56.

Das zu betrachtende Object mn (Fig. 56) ist etwas weiter von dem Objectivglase ab entfernt, als die Brennweite desselben beträgt. Nach §. 195 muß also in größerer Entfernung auf der anderen Seite des Objectivs ein verkehrtes und vergrößertes Bild des Gegenstandes m'n' entstehen. Wird nun das Ocularglas AB so gestellt, daß das entstandene Bild innerhalb der Brennweite desselben fällt, dann müssen wir durch das Ocular, grade wie bei dem einfachen Mikroscope, ein aufrechtes und vergrößertes Bild des Objects, jetzt ein aufrechtes und vergrößertes Bild dieses verkehrten Bildes m''n'' in der Weite des deutlichen Sehens erblicken. Die Linsen werden in einer Röhre gefaßt, welche inwendig geschwärzt ist, damit alles auf die Seitenwand der Röhre etwa auffallende Licht, das durch Reflexion die Deutlichkeit des Bildes beeinträchtigen könnte, sofort absorbirt werde. Da, wo das von dem Objectiv erzeugte Bild hinfallen muß, ist im Innern der Röhre noch ein geschwärzter, kreisförmiger Ring, ein Diaphragma (διάφραγμα Scheide- oder Zwischenwand) angebracht. Der Zweck desselben ist, von den durch das Objectiv gegangenen Strahlen die Randstrahlen wegen ihrer sphärischen Aberration bei Erzeugung des Bildes möglichst unwirksam zu machen (vergl. §. 196). Der sphärischen Abweichung des Oculars sucht man dadurch entgegenzuwirken, daß man auch nur den kleineren centralen Theil desselben von der Fassung unbedeckt läßt. Daß auch hier das Ocular aus zwei Converlinsen zusammengesetzt sein kann, und dann die im vorigen §. besprochenen Vortheile gewährt, bedarf keiner weitern Auseinandersetzung. Das Objectiv muß jedenfalls eine achromatische

Digitized by Google

Linse sein. Indessen hat es große Schwierigkeiten, bei der Kleinheit des Krümmungshalbmessers solche Doppellinsen aus Crown- und Flintglas so zu combiniren, und ihre vier gekrümmten Flächen so zu schleifen, daß die chromatische und sphärische Abweichung vollkommen aufgehoben würde. Diesen Zweck erreicht man vollständiger dadurch, daß man zwei oder drei achromatische Linsen, über einander geschraubt, als Objectiv anwendet. Hierdurch wird zugleich noch der Vortheil erreicht, dessen schon bei den aus zwei Gläsern zusammengesetzten einfachen Mikroscopen erwähnt wurde, nämlich daß auch ein deutlicheres und helleres Bild erzielt wird, da man den einzelnen Linsen eine größere Oeffnung geben kann, als wenn dieselbe Vergrößerung durch eine einzige Linse hervorgebracht werden soll. Daß man bei den vollkommneren Instrumenten verschiedene Combinationen von Objectiven und Ocularen darstellen kann, um nach Umständen bald eine größere, bald eine kleinere Vergrößerung hervorzurufen, ist bekannt. Zur Deutlichkeit des Bildes trägt natürlich auch die Intensität des von dem Objecte ausgehenden Lichtes bei. Deßwegen haben diese Instrumente auch noch einen eigenen Beleuchtungsapparat. Für ein durchsichtiges Object besteht dieser gewöhnlich darin, daß unter demselben ein flacher Hohlspiegel angebracht ist, dem sich jede beliebige Lage geben läßt, und der demnach bei den Versuchen so gestellt werden muß, daß er das auf ihn fallende Licht nach dem Objecte reflectirt. Für opake Objecte hat man gewöhnlich zur Seite derselben eine Converlinse von großer Oeffnung, welche das durch sie hindurchgehende Licht auf dem Objecte concentrirt. Oefter findet man auch zwischen dem Objectiv- und Ocularglase noch eine dritte Linse in dem Rohre angebracht. Diese führt den Namen Collectivglas, und muß ihre Stelle zwischen dem Orte des Bildes und dem Objectivglase erhalten, so daß die aus dem Objectiv austretenden convergirenden Strahlen durch dasselbe noch convergenter gemacht, und noch früher zu einem kleineren Bilde vereinigt werden. Der Hauptzweck des Collectivs ist, noch Resten der chromatischen Abweichung, welche durch das achromatische Objectiv nicht vollständig aufgehoben wurde, entgegen zu wirken.

Fig. 57.

Denn gesetzt der Randstrahl A (Fig. 57) werde durch das Objectiv O noch zerstreut, so daß der rothe Theil die Richtung a b, und der violette die Richtung a c erhält. Nun treffen sie auf das Collectiv C; der violette Theil a c trifft aber C mehr nach der Mitte zu, als der rothe, und wird deßwegen durch C weniger abgelenkt, als a b, wodurch es möglich gemacht wird, daß die aus C ausfahrenden Strahlen c d und b e einander parallel werden. Da das Objectiv bereits ein vergrößertes Bild gibt, und dieses durch das Ocular abermals vergrößert wird, so ist klar, daß man die Vergrößerung eines zusammengesetzten Mikroscopes findet, wenn man die Vergrößerung des Objectives und diejenige des Oculars einzeln berechnet, und die gefundenen Zahlen mit einander multiplicirt.

Man hat auch katoptrische oder Spiegelmikroscope construirt, bei welchen die von einem Objecte ausgehenden Strahlen zuerst auf einen

Digitized by Google

Planspiegel fallen, von diesem auf einen elliptischen Hohlspiegel geworfen werden, der sie so reflectirt, daß sie sich innerhalb der Brennweite des Ocularglases zu einem Bilde vereinigen. Dieses Bild wird dann durch das Ocularglas, wie durch ein einfaches Mikroscop, betrachtet. Solche Instrumente haben jedoch nur eine geringe Verbreitung gefunden, weßhalb hier nicht weiter auf eine nähere Beschreibung derselben eingegangen werden kann.

§. 219. **Sonnenmikroscop, Knallgasmikroscop, Zauberlaterne.** Wenn die in dem vorigen Paragraphen beschriebenen Mikroscope nur dem Einzelnen die Beschauung eines Objectes gestatten, also gewissermaßen nur subjective Bilder hervorbringen, so erlauben diejenigen, von welchen jetzt die Rede sein wird, daß viele Personen zu gleicher Zeit das erzeugte Bild betrachten, die von ihnen bewirkten Bilder sind also objective Bilder. Was nun zunächst das Sonnenmikroscop betrifft, so wird dieses in den Fensterladen eines verdunkelten Zimmers eingesetzt. Vor der Oeffnung des Fensterladens ist ein Heliostat angebracht, der die auf ihn fallenden Strahlen parallel nach der Sammellinie C (Fig. 58.) reflectirt. Durch C werden sie nach dem Brennpunkte zusammengebrochen. Hier befindet sich das kleine Object ab, das auf diese Weise eine sehr intensive Beleuchtung erhält. Die von dem Objecte ab ausgehenden Strahlen fallen nun auf die Objectivlinse O, welche eine kleine achromatische Linse von kurzer Brennweite ist, oder auch aus mehreren achromatischen Linsen zusammengesetzt wird. Durch O wird nun nach §. 195 in einer Entfernung, welche von der Entfernung von ab von O abhängt, ein verkehrtes vergrößertes Bild erzeugt, welches man dann auf einem weißen Schirme oder einer weißen Wand auffängt. Je näher ab dem Brennpunkte von O rückt, in desto weiterer Entfernung entsteht das Bild, und desto vergrößerter ist es. Wenn demnach O in einer beweglichen Fassung sich befindet, so kann man die Vergrößerung nach Belieben größer oder kleiner machen. Man darf aber dabei nicht übersehen, daß für eine feste unveränderliche Stellung der Wand oder des Schirmes nur eine bestimmte Entfernung der Objectivlinse O von ab ein deutliches Bild auf der Wand oder dem Schirme hervorruft. Ferner muß man bedenken, daß, da bei stärkeren Vergrößerungen die Wand von O weiter abstehen muß, und da die Beleuchtung abnimmt, wie die Quadrate der Entfernungen zunehmen, die erzeugten Bilder desto mehr aus Mangel an Helligkeit undeutlich werden, eine je stärkere Vergrößerung man dem Bilde gibt.

Fig. 58.

Mit der Einrichtung des Sonnenmikroscops im Wesentlichen übereinstimmend, und nur in der Art und Weise, wie die Beleuchtung des Objects bewirkt wird, verschieden ist das Hydro-Oxygengasmikroscop oder das Knallgasmikroscop. Zur Beleuchtung wird nämlich bei diesem Instrumente das Drummond'sche Licht, das allerintensivste künstliche Licht angewandt, das bekanntlich dadurch entsteht, daß ein sich fortwährend dre-

Digitized by Google

hender Kalkcylinder der Flamme des Knallgases ausgesetzt wird. Da jedoch die von dem Kalkcylinder ausgehenden Lichtstrahlen nicht, wie die des Sonnenlichtes, parallel, sondern divergirend auf die Collectivlinse fallen, so können sie, wenn der Cylinder um die Brennweite von dem Glase absteht, durch dieses nur parallel gemacht werden. Deßwegen bringt man dann noch ein zweites Collectivglas an, um die parallel gemachten Strahlen dann in seinem Brennpunkte, in welchem sich das Object befindet, zu vereinigen. Diese Vorrichtung hat vor dem Sonnenmikroscop den Vortheil, daß es, während man sich des letzteren nur bei directem Sonnenscheine bedienen kann, bei jeder Witterung und zu allen Tageszeiten angewandt werden kann.

Noch ein dritter Apparat muß hierher gerechnet werden, es ist dies die auch als Spielzeug gebrauchte Zauberlaterne (laterna magica). Der wesentliche Unterschied von den beiden vorigen Instrumenten besteht wieder nur in der Art der Beleuchtung des Objects. Als Lichtquelle dient die Flamme einer gewöhnlichen Lampe, hinter welcher sich ein kleiner Hohlspiegel befindet, um die auf ihn fallenden Strahlen nach dem Objecte zu reflectiren. Die Objecte sind gewöhnlich auf eine Glastafel mit durchscheinenden Farben gemahlte Bilder, die man, um aufrechte Bilder zu erhalten, verkehrt einsetzen muß. Das Objectiv ist aus 2 größeren Linsen zusammengesetzt statt einer kleineren mit kürzerer Brennweite, wodurch, wie schon bemerkt, dem Bilde eine größere Helligkeit gegeben wird. Daß man bei der Schwäche der Beleuchtung die Vergrößerung nicht sehr weit treiben darf, ist selbstverständlich, aber auch für den beabsichtigten Zweck gar nicht nothwendig. Durch die Zauberlaterne werden auch die s. g. Phantasmagorien (φάντασμα Gespenst, ἀγείρω ich versammle; Gespenstererscheinungen) hervorgebracht. Zu diesem Zwecke werden die Bilder auf einem durchscheinenden Vorhang aufgefangen, hinter welchem die Zuschauer sich befinden. Durch Nähern oder Entfernen der Zauberlaterne werden die Bilder größer oder kleiner, und durch optische Täuschung scheinen sie sich dem Zuschauer dann zu nähern, oder sich von demselben zu entfernen.

§. 220. **Das holländische oder Galilei'sche Fernrohr.** Die Fernröhre werden eingetheilt in dioptrische und katoptrische, je nachdem als Objectiv Linsen oder Spiegel angewandt werden. Die ersteren heißen auch Refractoren, und die letzteren Reflectoren oder Spiegeltelescope. Unter einem Tubus (tubus, das Rohr) versteht man ein dioptrisches Fernrohr mittlerer Größe, und unter einem Achromaten ein dioptrisches Fernrohr, dessen Objectiv eine achromatische Linse ist. Daß jetzt alle besseren Instrumente Achromaten sein müssen, bedarf keiner besonderen Erwähnung. Da die Fernröhre angewandt werden, um Gegenstände, welche wegen zu großer Entfernung einen zu kleinen Gesichtswinkel haben, deutlich zu sehen, und da, um ein deutliches Bild hervorzurufen, erforderlich ist, daß von den verschiedenen Punkten des Objects entweder sehr intensive Lichtstrahlen, oder eine große Menge von Lichtstrahlen in unser Auge gelangen, da wir aber bei fernen Gegenständen nicht, wie bei den Objecten der Mikroscope, es in unserer Macht haben, die Intensität des von ihnen ausgehenden Lichtes durch künstliche Beleuchtung zu verstärken, so wird man bei der Construction der Fernröhre jedenfalls darauf zu sehen haben, daß durch diese Instrumente von den einzelnen Punkten der zu betrachtenden

Digitized by Google

Gegenstände eine größere Menge Lichtstrahlen in das Auge gelangen können, als dies bei unbewaffnetem Auge der Fall sein würde. Während bei den Mikroscopen die Objective wegen der Stärke der Beleuchtung nur von geringer Oeffnung zu sein brauchten, wird man also, um den beabsichtigten Zweck zu erreichen, den Objectiven der Fernröhre eine möglichst große Oeffnung geben müssen.

Wenn von der Vergrößerung der Fernröhre die Rede ist, so kann darunter offenbar nicht, wie bei den Mikroscopen, die Zahl verstanden werden, die angibt, wie vielmal das erzeugte Bild größer ist, als das Object selbst, sondern nur die Zahl, welche angibt, wie vielmal der Gesichtswinkel, unter welchem uns das Bild erscheint, größer ist, als der Gesichtswinkel, unter welchem wir mit unbewaffnetem Auge den Gegenstand selbst sehen würden.

Wir wollen nun die Construction der einzelnen Fernröhre etwas näher kennen lernen, und uns zunächst zu den dioptrischen wenden. Von allen Fernröhren ist das älteste das holländische oder Galilei'sche. Es heißt das holländische, weil es um das Jahr 1608 von einem holländischen Brillenmacher, Hans Lipperschey, in Middelburg erfunden wurde; es heißt aber auch das Galilei'sche, weil Galilei, der von dieser Entdeckung gehört hatte, es im Jahre 1610 nacherfand. Im holländischen Fernrohr ist eine Converlinse als Objectivglas mit einer Concavlinse als Ocularglas verbunden. Die negative Brennweite des Oculars muß bedeutend kleiner sein, als die Brennweite des Objectivs. Beide Gläser müssen so mit einander verbunden sein, daß das Ocular zwischen dem Objectiv und dessen Brennpunkt liegt, und zwar muß es von diesem Brennpunkte um etwas mehr, als seine eigene Brennweite abstehen. Da eine Converlinse von einem fernen Gegenstande in der Nähe des Brennpunkts ein kleines verkehrtes Bild gibt, so kann bei unserer Combination das Bild des Objectivs gar nicht zur Wirklichkeit kommen, denn ehe die von einem Punkte ausgehenden Strahlen sich im Bilde wieder vereinigen, sind sie gezwungen, durch das concave Ocular zu gehen. Durch dieses verlieren sie ihre Convergenz, und werden divergent. So gelangen sie in das Auge, und es muß uns demnach so vorkommen, als ob sie sich erst zwischen dem Ocular und Objectiv schnitten. Die Aren der von den äußersten Punkten des Objects kommenden Strahlenkegel sind ohne das Ocular ebenfalls convergent, werden aber durch ihren Durchgang durch das Ocular auch divergent. Dadurch gelangen die Strahlen so in das Auge, als kämen sie von einem aufrechten Bilde zwischen den Linsen. Da die von den äußersten Punkten des Objects kommenden Strahlen hinter dem Oculare divergirend auseinander gehen, so folgt daraus, daß man das Auge ganz dicht an das Ocular halten müsse, wenn diese Strahlen das Auge noch treffen sollen. Daraus geht hervor, daß das Gesichtsfeld dieser Fernröhre nur klein sein könne. Es wird aber noch um so kleiner, je kleiner die Oeffnung des Oculars ist. Diese wird aber bedingt durch die Krümmung desselben. Da nun, wie wir sogleich sehen werden, von der Krümmung des Oculars die Stärke der Vergrößerung des Fernrohrs abhängt, so erhellt, daß man mit dem holländischen Fernrohr keine starke Vergrößerung erzielen kann. Die besten Instrumente bringen es höchstens bis zu einer 30fachen Vergrößerung. Sie sind daher gewöhnlich wegen ihrer geringen Länge auch nur als Taschen-

Digitized by Google

perſpective oder Opernglucker oder als Reiſeperſpective unter dem Namen Feldſtecher im Gebrauch.

Fig. 59.

Die Stärke der Vergrößerung ſolcher Inſtrumente ergibt ſich aus Folgendem. Man denke ſich das unbewaffnete Auge in a (Fig. 59), ba und ca ſeien die von den äußerſten Punkten des Objects in daſſelbe gelangenden Strahlen, dann iſt der Geſichtswinkel für das unbewaffnete Auge $bac = c'ab'$. Das Bild b″c″ erſcheint einem in a″ befindlichen Auge unter dem Winkel $b''a''c'' = c'a''b'$. Die Vergrößerung iſt demnach $= \sphericalangle c'a''b' : \sphericalangle c'ab'$. Da indeß dieſe Winkel nur klein ſind, ſo verhalten ſie ſich wie ihre Tangenten, alſo $\sphericalangle c'a''b' : \sphericalangle c'ab' = \frac{c'a'}{a''a'} : \frac{c'a'}{aa'} = aa' : a''a'$. Nach dem oben Geſagten kann aber ohne merklichen Fehler die Entfernung aa′ des Bildes, welches ohne Gegenwart des Oculars hervorgerufen werden würde, der Brennweite des Objectivs, und die Entfernung a″a′ des Oculars von demſelben der negativen Brennweite des Oculars gleichgeſetzt werden. Man erhält demnach die Vergrößerungszahl, wenn man die Brennweite des Objectivs durch die Brennweite des Oculars dividirt.

§. 221. Das aſtronomiſche oder Keppler'ſche Fernrohr; camera clara. Der Hauptmangel des holländiſchen Fernrohrs, daß es nur ſchwache Vergrößerungen verträgt, iſt bei dem um das Jahr 1620 von Keppler erfundenen dioptriſchen Fernrohr gehoben. Es beſteht aus einer Combination von einem converen Objectivglaſe mit einem converen Ocularglaſe. Die Brennweite des letzteren iſt kleiner, als die des erſteren. Beide Gläſer ſtehen um die Summe ihrer Brennweiten von einander ab. Das Objectivglas erzeugt von weit entfernten Gegenſtänden in der Nähe des gemeinſchaftlichen Brennpunkts und innerhalb der Brennweite des Oculars ein verkleinertes und verkehrtes Bild, welches durch das Ocular in der Weite des deutlichen Sehens in derſelben Lage, aber vergrößert geſehen wird. Man ſieht aus der gegebenen Beſchreibung, daß das Keppler'ſche Fernrohr ganz mit dem zuſammengeſetzten Mikroſcope übereinſtimmt, und daß der Hauptunterſchied beider Inſtrumente nur darin beſteht, daß das Fernrohr aus dem im vorigen Paragraphen angegebenen Grunde ein weit größeres Objectivglas haben muß. Die Veränderungen der einfachſten Conſtruction, welche wir ſchon bei dem zuſammengeſetzten Mikroſcope angegeben haben, die Einſetzung eines Collectivglaſes, der Gebrauch eines zuſammengeſetzten Oculars, die Vorrichtung, daß verſchiedene Oculare mit demſelben Objective verbunden werden können, werden hier aus den dort entwickelten Gründen ebenſo zweckmäßig in Anwendung gebracht. Das Bild dieſes Fernrohrs iſt, wie ſchon bemerkt, immer verkehrt, deßhalb bedient man ſich deſſelben hauptſächlich bei aſtronomiſchen Beobachtungen und bei Meßwerkzeugen, da in beiden Fällen nicht viel darauf ankommt, ob wir die Gegenſtände aufrecht oder verkehrt ſehen. Aus dieſem Grunde führt es gewöhnlich auch den

Digitized by Google

Namen des astronomischen Fernrohrs oder des Sternrohrs. Durch eine ganz ähnliche Betrachtung, wie bei dem holländischen Fernrohr, findet man, daß auch für das astronomische Fernrohr die Vergrößerungszahl erhalten wird, wenn man die Brennweite des Objectivs durch diejenige des Oculars dividirt.

Wenn in der in §. 195 beschriebenen camera obscura das Bild, statt auf einer mattgeschliffenen Glastafel aufgefangen zu werden, durch eine Converlinse betrachtet wird, so heißt der Apparat camera clara (helle Kammer). Es ist dies Instrument eigentlich dann Nichts, als ein Keppler'sches Fernrohr mit gebrochener Are.

§. 222. **Das terrestrische Fernrohr.** Soll ein Fernrohr benutzt werden, um ferne Gegenstände auf der Erdoberfläche deutlich zu sehen, dann ist jedenfalls der Umstand, daß die Gegenstände verkehrt gesehen werden, sehr störend. Diesem Uebelstande ist durch das von dem Pater Rheita erfundene terrestrische oder Erdfernrohr abgeholfen, in welchem das durch das Objectiv erzeugte verkehrte Bild erst noch einmal umgekehrt, also in die Lage des ursprünglichen Objects gebracht wird, ehe es durch das Ocular betrachtet wird. Zu diesem Zwecke werden in der Regel noch zwei Converlinsen verwandt, so daß das Erdfernrohr aus vier oder bei zusammengesetztem Oculare aus fünf Gläsern besteht. Die beiden neuen Linsen bilden mit dem Oculare zusammen gewissermaßen ein kleines zusammengesetztes Mikroscop, dessen Objecte die von dem Objective hervorgerufenen verkleinerten und verkehrten Bilder der äußeren Gegenstände sind. Daß in diesem Fernrohr die Gegenstände weniger hell erscheinen müssen, als unter gleichen Umständen in dem astronomischen, geht daraus hervor, daß die Strahlen eine mehrmalige Brechung erleiden, da das Licht bei jedem Durchgang durch ein Glas geschwächt wird.

§. 223. **Das dialytische Fernrohr.** Es ist schon erwähnt, daß bei allen besseren dioptrischen Fernröhren das Objectiv nothwendig eine achromatische Linse sein müsse, weil sonst bei der großen Oeffnung desselben die Farbenzerstreuung sehr bedeutend sein, und dadurch die Deutlichkeit des Bildes in hohem Grade beeinträchtigt werden würde. Nun aber unterliegt die Anfertigung von großen, vollkommen gleichartigen Stücken Flintglas großen Schwierigkeiten. Die Bestandtheile desselben haben nämlich ein sehr verschiedenes specifisches Gewicht. Werden sie nun zusammengeschmolzen, so sinken die schweren im flüssigen Zustande nach Unten, wodurch in den einzelnen Theilen eine verschiedene Dichtigkeit und dadurch ein verschiedenes Brechungs- und Farbenzerstreuungsvermögen hervorgerufen wird. Plößl hat daher in dem im Jahre 1832 von ihm zuerst angefertigten dialytischen Fernrohre (διαλύειν trennen) folgende Abänderung ersonnen. Das eigentliche Objectivglas ist nur eine Crownglaslinse, dagegen ist die Flintglaslinse, durch welche die Farbenzerstreuung wieder aufgehoben werden soll, nicht unmittelbar mit der Crownglaslinse verbunden, sondern erst in einiger Entfernung von derselben angebracht. Da aber die durch die Crownglaslinse gegangenen Strahlen sich bis dahin schon stark genähert haben, so braucht die Flintglaslinse, ohne daß an dem Effekte etwas geändert würde, nur einen viel kleineren Durchmesser zu haben.

§. 224. **Die verschiedenen Spiegeltelescope.** Ehe Dollond im Jahre 1758 achromatische Linsen anzufertigen gelehrt hatte, war man bemüht

Digitized by Google

gewesen, die so sehr hinderliche chromatische Abweichung der dioptrischen Fernröhre auf andere Weise zu beseitigen. Da Converlinsen und Hohlspiegel in ihrer Wirkungsweise so große Aehnlichkeit zeigen, das reflectirte Licht aber keine Farbenzerstreuung erleidet, so lag der Gedanke nahe, die Converlinsen als Objectivgläser durch Hohlspiegel zu ersetzen. So entstanden die Spiegeltelescope oder Reflectoren, namentlich durch die Bemühungen von Gregory und seinem großen Zeitgenossen Newton (1663 — 1666). Von allen die einfachste Construction hat Herschel's Spiegeltelescop. Auf dem Boden des Rohrs und etwas gegen die Are desselben geneigt ist ein Hohlspiegel angebracht, der von weit entfernten Gegenständen bei dem Focus in der Nähe des unteren Randes ein kleines verkehrtes Bild hervorbringt, welches durch das Ocularglas, das an dem unteren Rande des Rohrs angebracht ist, von dem Beobachter vergrößert betrachtet wird. Von dieser Einrichtung ist das berühmt gewordene Herschel'sche Riesentelescop, mit welchem Herschel die meisten seiner wichtigen Entdeckungen gemacht hat. Im Gregory'schen Reflector ist der am Boden des Rohrs befestigte, aber nicht gegen die Are geneigte Hohlspiegel in der Mitte durchbohrt. Die auf ihn fallenden Strahlen vereinigen sich zu einem verkleinerten und verkehrten Bilde; dieses Bild wird wieder Object für einen zweiten, in dem Rohre angebrachten, bedeutend kleineren Hohlspiegel, der dann von diesem Bild ein Bild in der Oeffnung des großen Hohlspiegels hervorruft, welches durch das an dieser Oeffnung angebrachte Ocular betrachtet wird. Da das zweite Bild im Verhältniß zum ersten eine umgekehrte Lage hat, so sieht man also mit diesem Fernrohr die Gegenstände selbst aufrecht. Von dem Gregory'schen Instrumente unterscheidet sich das Cassegrain'sche nur dadurch, daß an die Stelle des kleinen im Innern des Rohrs befindlichen Hohlspiegels ein kleiner Converspiegel tritt, welcher die von dem großen Hohlspiegel reflectirten Strahlen früher auffängt, als sie sich zu einem Bilde vereinigt haben. Durch den Converspiegel wird die Convergenz der reflectirten Strahlen geringer, als die der auffallenden Strahlen, und das Bild entsteht auch hier erst innerhalb der Brennweite des Oculars. Im Newton'schen Telescope endlich ist der Hohlspiegel ebenso wenig, wie in dem Herschel'schen, in der Mitte durchbrochen, aber auch nicht gegen die Are des Rohres geneigt, wie dies in dem letzteren der Fall ist. Die von dem Hohlspiegel reflectirten Strahlen werden hier, ehe sie sich zu einem Bilde vereinigen, durch einen kleinen Planspiegel aufgefangen, welcher gegen die Are unter einem Winkel von 45° geneigt ist. Durch den Planspiegel werden sie dann so reflectirt, daß sie sich innerhalb der Brennweite des Oculars, welches dem Planspiegel gegenüber an der Seite des Rohres angebracht ist, zu einem Bilde vereinigen. Dieses Bildchen wird dann durch das Ocular vergrößert gesehen. Da das Ocular an der Seitenwand des Rohres angebracht ist, so ist es sehr mühsam und schwierig, das Rohr auf einem Stern oder sonstigen kleinen entfernten Gegenstand einzustellen. Deßwegen ist mit einem solchen Telescope gewöhnlich noch ein kleines dioptrisches Fernrohr verbunden, welches mit der Are desselben parallel läuft, und vermittelst welches man das Einstellen bewerkstelligt. Wegen dieses Zweckes heißt das kleine Fernrohr der Sucher. Wenn auch durch die Größe der Spiegel bei den Spiegeltelescopen bewirkt werden kann, daß eine sehr bedeutende Menge von Strah-

Digitized by Google

len sich zu dem Bilde vereinigt, wodurch die Helligkeit der Bilder sehr vermehrt wird, so wird aus demselben Grunde auf der anderen Seite die sphärische Aberration desto größer.

Sechstes Kapitel.

Von der Interferenz und Beugung des Lichtes.

§. 225. **Zwei Theorien über das Wesen des Lichtes.** Bei den bisherigen Kapiteln haben wir uns nur an die Erfahrung gehalten, und dabei jede theoretische Ansicht über die Natur des Lichtes ganz vermieden. Bei den jetzt noch folgenden Kapiteln ist es ganz unmöglich, die Gesetze derselben überschtlich zu machen, ohne eine theoretische Ansicht über das Wesen des Lichts zur Hilfe zu nehmen. Zwei Hypothesen sind in dieser Hinsicht aufgestellt worden, die Emissions- oder Emanationstheorie (Newton), und die Vibrations- oder Undulationstheorie (Huyghens, L. Euler).

§. 226. **Grundzüge der Emissionstheorie.** Die Emissionstheorie nimmt eine eigenthümliche Lichtmaterie an, äußerst fein und imponderabel. Die leuchtenden Körper senden Theilchen dieser feinen Materie nach allen Seiten hin mit ungeheurer Geschwindigkeit aus (42100 deutsche Meilen). Die Verschiedenheit der Farbe rührt von einer Verschiedenheit in der Geschwindigkeit her. Die Reflexion ist dem Abprallen elastischer Körper analog. Zur Erklärung der Brechung wird angenommen, 1) daß sich in den durchsichtigen Körpern hinreichend große Zwischenräume befinden, um den Lichttheilchen den Durchgang zu gestatten, und 2) daß die wägbaren Molecüle auf die Lichttheilchen eine anziehende Kraft ausüben, welche in Verbindung mit der einmal erlangten Geschwindigkeit der Lichttheilchen ihre Ablenkung bewirkt.

Diese Theorie stand wegen ihres Begründers Newton bis zu Anfang dieses Jahrhunderts in großem Ansehen.

§. 227. **Grundzüge der Vibrationstheorie.** Die Vibrationstheorie, welche durch Young's und Fresnel's Arbeiten jetzt in fast allgemeiner Geltung ist, nimmt an, daß sich das Licht durch die Schwingungen der Theilchen eines unwägbaren Stoffes, des Aethers, fortpflanzt. Das Licht ist dem Schalle analog (Fortpflanzung durch Schwingungen der Luft, Fortpflanzung durch Schwingungen des Aethers). Der Aether muß den ganzen Weltenraum erfüllen, weil das Licht alle Räume des Himmels durchdringt *). Der Aether durchdringt aber auch alle Körper, und füllt die zwischen den wägbaren Atomen befindlichen Räume aus. Wenn der Aether in dem ganzen Weltenraume in Ruhe wäre, so würde überall vollkommne Finsterniß herrschen; wird er aber an irgend einer Stelle erschüttert, so pflanzen sich die Lichtwellen nach allen Seiten hin fort. Die Theilchen eines leuchtenden Körpers vibriren auf ähnliche Weise, wie dies bei den schallen-

*) Die Annahme eines den Weltenraum erfüllenden Aethers hat an Wahrscheinlichkeit gewonnen, seitdem Encke die verzögerte Tangentialbewegung des nach ihm benannten Cometen, dessen Umlaufszeit von 1786 bis 1838 regelmäßig von Umlauf zu Umlauf um 1,8 Tage kürzer geworden ist, aus dem Widerstande eines sehr dünnen, das Universum erfüllenden Mittels erklärt hat.

Digitized by Google

den Körpern der Fall ist, nur ungleich schneller, und die Vibrationen theilen sich, wie schon bemerkt, nicht der Luft, sondern dem Lichtäther mit.

Fig. 60.

Wenn sich ein Lichtstrahl in der Richtung von A nach B (Fig. 60) verbreitet, so vibriren alle Aethertheilchen, welche im Zustande des Gleichgewichts auf AB liegen würden, in Richtungen, welche rechtwinklig auf AB stehen. Man kann sich die Art und Weise dieser Vibrationen versinnlichen durch ein gespanntes Seil, wenn man an dem einen Ende einen kräftigen Schlag gegen dasselbe geführt hat. Die Curve in der Figur stellt die gegenseitige Stellung der vibrirenden Molecüle in einem bestimmten Momente der Bewegung dar. Ein Theilchen, dessen Gleichgewichtslage in b ist, vibrirt beständig zwischen b′ und b″. In b′ ist seine Geschwindigkeit $= 0$, von b′ nach b wächst sie aber immer mehr, erreicht ihr Maximum in b, nimmt dann wieder ab, bis sie in b″ wieder $= 0$ ist, worauf die Bewegung nach entgegengesetzter Richtung beginnt.

§. 228. **Fortsetzung.** Obgleich die Geschwindigkeit des Lichtes außerordentlich groß ist, so geschieht doch offenbar die Fortpflanzung desselben nicht momentan. Deßwegen können auch die Schwingungen eines Aethertheilchens ebenso wenig momentan sich den in der Richtung des Strahles folgenden Aethertheilchen mittheilen, sondern zu dieser Mittheilung gehört eine, wenn auch noch so kleine Zeit. Während also das Aethertheilchen b eine vollständige Oscillation macht, d. h. von b′ nach b″ und wieder zurück nach b′, oder auch von b nach b′, nach b″ und wieder nach b, wird ein anderes Theilchen c eben erst anfangen zu schwingen. Von nun an werden b und c sich stets in gleichen Schwingungszuständen befinden, d. h. sie werden gleichzeitig nach derselben Seite hin sich bewegend die Gleichgewichtslage passiren, gleichzeitig das Maximum der Ausweichung auf der einen und auf der anderen Seite erreichen. Die Entfernung bc zweier solcher Aethertheilchen heißt eine **Wellenlänge**. Wenn demnach l die Wellenlänge, v die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts und t die Schwingungsdauer bezeichnet, so ist offenbar $l = vt$. Ebenso wird auch das Theilchen d, welches von c um eine Wellenlänge absteht, stets mit c, und also auch mit b, in gleichen Schwingungszuständen sich befinden u. s. w. Es wird deßhalb behauptet: **alle Aethertheilchen auf dem Wege eines Lichtstrahls, welche um eine Wellenlänge oder um ein Vielfaches einer Wellenlänge von einander entfernt sind, befinden sich stets in vollkommen gleichen Schwingungszuständen.**

Aus diesem Gesetze folgt auch, daß, wenn zwei Strahlen von der Lichtquelle bis zu irgend einem Punkte a gleiche Wege durchlaufen haben, das Theilchen a gleichzeitig durch die Vibrationen beider Strahlen auf dieselbe Weise afficirt wird, daß also seine Vibrationsintensität doppelt so groß ist, als wenn seine Bewegung nur durch die Vibrationen des einen Lichtstrahls bedingt wäre. In derselben Weise müssen sich natürlich auch die Vibratio-

Digitized by Google

nen zweier Lichtstrahlen unterstützen, welche in einem Punkte zusammentreffen, und deren Wege bis zu diesem Punkte um irgend ein Vielfaches einer Wellenlänge von einander verschieden sind.

§. 229. **Fortsetzung.** Wenn f in der Mitte zwischen b und c liegt, d. h. wenn es um $\frac{1}{2}$ Wellenlänge von b entfernt ist, so befindet es sich offenbar in Schwingungszuständen, welche denen von b und c entgegengesetzt sind. Wenn b und c das Maximum der Ausweichung oberhalb AB erreichen, so erreicht f das Maximum auf der entgegengesetzten Seite; es geht aber mit b und c gleichzeitig durch die Gleichgewichtslage, jedoch in entgegengesetzter Richtung. Wie f sich zu b verhält, so verhält sich offenbar auch jedes Theilchen, welches von f um irgend ein Vielfaches einer Wellenlänge absteht. Deßwegen gilt in der Vibrationstheorie der Satz: alle Aethertheilchen, welche auf dem Wege eines Lichtstrahls um $\frac{1}{2}$ Wellenlänge oder um ein ungerades Vielfaches einer halben Wellenlänge abstehen, sind stets von gleichen, aber entgegengesetzten Geschwindigkeiten afficirt.

Aus diesem Gesetze folgt auch, daß, wenn zwei Strahlen, von welchen der eine dem anderen um $\frac{1}{2}$ Wellenlänge oder um ein ungerades Vielfaches einer halben Wellenlänge vorausgeeilt ist, in einem Punkte a zusammentreffen, das Aethertheilchen a durch die Vibrationen des einen Strahls in demselben Augenblicke nach einer Richtung getrieben wird, in welchem die Vibrationen des anderen Strahls es mit gleicher Kraft nach der entgegengesetzten Richtung zu bewegen streben, daß demnach die beiden entgegengesetzten Kräfte sich aufheben, und das Theilchen a in Ruhe bleibt.

Ist der Unterschied der Wege der beiden Strahlen in dem Punkte, wo sie zusammentreffen, weder eine Wellenlänge oder ein Vielfaches einer Wellenlänge, noch eine halbe Wellenlänge oder ein ungerades Vielfaches einer halben Wellenlänge, sondern fällt zwischen diese Grenzen, so kann natürlich weder eine vollkommene Vernichtung der Vibrationen, noch auch eine Verdoppelung der Vibrationsintensität eintreten, und die wirklich hervorgehende Vibrationsintensität nähert sich mehr der vollkommnen Vernichtung der Vibrationen oder der Verdopplung der Vibrationsintensität, je nachdem der Unterschied der Wege mehr einem ungraden Vielfachen einer halben Wellenlänge oder einem Vielfachen einer ganzen Wellenlänge gleich ist.

§. 230. **Fortsetzung.** Die Wellenlänge ist für verschiedenfarbiges Licht nicht gleich, sie ist am größten für die rothen, am kleinsten für die violetten Strahlen. Da aber die Fortpflanzungsgeschwindigkeit für alle Gattungen des Lichtes gleich groß ist (42100 deutsche Meilen), so macht demnach rothes Licht in derselben Zeit weniger Schwingungen, als violettes, oder, was dasselbe ist, rothes Licht braucht zu einer Schwingung mehr Zeit, als violettes. Verschiedenfarbiges Licht hat also auch eine verschiedene Schwingungsdauer (Höhe und Tiefe der Töne).

Die Intensität des Lichtes hängt von der Vibrationsintensität oder der Größe der Oscillationsamplitüde ab, und zwar so, daß die Intensität des Lichtes dem Quadrate der Vibrationsintensität proportional ist (verschiedene Stärke des Schalles).

Sowie sich die Wasserwellen in concentrischen Kreisen um den Oscillationsmittelpunkt verbreiten, so verbreiten sich die Lichtvibrationen in con-

Digitized by Google

centrischen Kugelschichten um die Lichtquelle. Die Oberfläche der Lichtwellen oder diejenige Fläche, in welcher die von einem Lichtpunkte ausgehenden Vibrationen gleichzeitig anlangen, ist kugelförmig, wenigstens so lange die Elasticität des Aethers nach allen Richtungen hin dieselbe bleibt.

§. 231. Fortsetzung. Wenn eine Lichtwelle auf irgend ein Medium trifft, in welchem die Elasticität des Aethers größer oder kleiner ist, als in dem Mittel, in welchem sie sich bis dahin fortpflanzte, so theilt sie sich in zwei Wellensysteme, von welchen das eine in das Mittel zurückgeht, welches bis dahin die Wellen fortpflanzte, während das zweite Wellensystem in das andere Mittel übergeht; die Richtung beider Wellensysteme weicht von derjenigen der einfallenden Wellen ab. Das eine System erzeugt die reflectirten, das andere die gebrochenen Strahlen.

Fig. 61.

Betrachten wir zunächst das Wellensystem, welches in das Mittel zurückgeht. am (Fig. 61) sei ein Lichtstrahl, welcher in m die Trennungsfläche zweier Mittel trifft. Durch die Vibrationen dieses Strahles wird nun offenbar das in m befindliche Aethertheilchen erschüttert; die Vibrationen dieses Theilchens pflanzen sich aber nach allen Seiten hin fort, grade so, als ob es selbst ein leuchtender Punkt wäre. Es breiten sich also von m aus nach allen Seiten hin Lichtstrahlen aus; aber die Vibrationen eines einzigen elementaren Strahls bringen für sich noch keine Wirkung hervor. Das, was wir einen Lichtstrahl nennen, besteht aus einer Reihe paralleler elementarer Strahlen, in welchen die entsprechenden Theilchen sich in gleichen Schwingungszuständen befinden, so daß sich ihre Vibrationen gegenseitig unterstützen. Der Grundsatz, daß wirksame Lichtstrahlen erst durch das Zusammenwirken von Elementarstrahlen gebildet werden, heißt das Huyghens'sche Princip. Es läßt sich nun nachweisen, daß, wenn am, a'm', a''m'' die Elementarstrahlen sind, welche den einfallenden Lichtstrahl bilden, von allen von m, m' und m'' in das Mittel zurückgehenden parallelen Elementarstrahlen nur diejenigen so beschaffen sind, daß in allen die entsprechenden Aethertheilchen sich stets in gleichen Schwingungszuständen befinden, welche von m, m' und m'' unter demselben Winkel zurückgeworfen werden, unter welchem sie auffallen, d. h. daß nur diese den reflectirten Strahl bilden können.

Wenn die Lichtquelle hinlänglich weit entfernt ist, so können die Strahlen am, a'm', a''m'' um so mehr als parallel betrachtet werden, als sie unendlich nahe bei einander liegend angenommen werden müssen. Aus demselben Grund kann dann auch die durch m und n gehende Wellenoberfläche wenigstens zwischen m und n als eben betrachtet werden. Diese ebene Welle wird nun zuerst in m, dann in m', und zuletzt in m'' die trennende Oberfläche beider Mittel treffen. Während die ebene Welle von n bis m'' fortschreitet, verbreitet sich von dem schon früher getroffenen Punkte m aus eine sphärische Welle, deren Halbmesser mo = nm'' sein muß, weil die

Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in demselben Mittel sich gleich bleibt. Ebenso wird sich bis zu der Zeit, wo die ebene Welle mn in m'' ankommt, von m' aus eine sphärische Welle verbreitet haben, deren Halbmesser m'o' = n'm'' ist. Auf dieselbe Weise werden von allen zwischen m und m'' liegenden Punkten elementare Kugelwellen ausgehen, und eine Fläche, welche alle diese elementaren Kugelwellen gleichzeitig berührt, ist die reflectirte Welle. Da sich nun mo : m'o' = nm'' : n'm'' = mm'' : m'm'' verhält, so ist klar, daß die Fläche, welche alle entsprechenden elementaren Kugelflächen berührt, eben ist. Auf ihr stehen die reflectirten Elementarstrahlen mr, m'r', m''r'' alle senkrecht, und sind folglich unter sich parallel. Die Theilchen o, o' und m'', oder r, r' und r'' befinden sich aber auch in gleichen Schwingungszuständen, und bilden deßhalb einen wirksamen Strahl, weil es Theilchen sind, welche auf derselben Wellenoberfläche om'' oder rr'' liegen. Daß sie von der trennenden Oberfläche beider Mittel unter demselben Winkel zurückgeworfen werden, unter welchem sie aufgefallen sind, geht aus der Congruenz der △△ mnm'' und mom'' hervor.

§. 232. **Fortsetzung.** Das Brechungsgesetz läßt sich auf ganz ähnliche Weise ableiten.

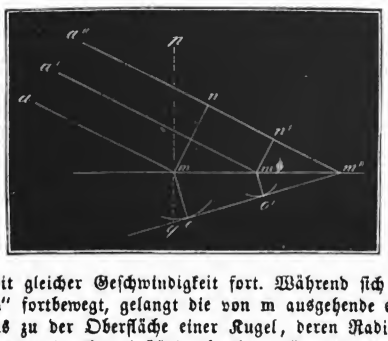


Fig. 61.

In demselben Momente, in welchem die ebene Welle mn (Fig. 62) in n ankommt, wird m der Mittelpunkt eines sphärischen Wellensystems, welches sich auch in das andere Mittel verbreitet. Weil aber die Elasticität des Aethers in dem zweiten Mittel eine andere ist, als in dem ersten, so pflanzen sich die Lichtwellen in beiden Mitteln auch nicht mit gleicher Geschwindigkeit fort. Während sich die ebene Welle von n bis m'' fortbewegt, gelangt die von m ausgehende entsprechende Elementarwelle bis zu der Oberfläche einer Kugel, deren Radius mo < nm'' ist, wenn das zweite Mittel stärker brechend ist, als das erste. Die einfallende ebene Welle kommt auch gleichzeitig in m' und n' an, und während sie von n' bis m'' fortgeht, verbreitet sich die entsprechende Elementarwelle von m' bis zur Oberfläche einer Kugel, deren Halbmesser m'o' sich zu mo verhält, wie nm'' zu n'm'' (denn das Verhältniß der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in beiden Mitteln bleibt sich ja stets gleich). Alle die von den verschiedenen zwischen m und m'' liegenden Punkten ausgehenden sphärischen Elementarwellen werden also sämmtlich durch eine Ebene m''o'o berührt. Die gebrochenen Elementarstrahlen mo, m'o' u. s. w. sind aber parallel, weil sie alle auf m''o'o senkrecht stehen; die Theilchen o, o' u. s. w. sind aber auch in gleichen Schwingungszuständen, weil es Theilchen sind, welche auf derselben Wellenoberfläche m''o'o liegen. Die Elementarstrahlen mo, m'o' u. s. w. bilden demnach den wirksamen gebrochenen Strahl. Nun ist $\frac{nm''}{mm''} = \sin. nmm''$

und $\frac{mo}{mm''}$ = sin. mm''o, also nm'' : mo = sin. nmm'' : sin. mm''o.

Das Verhältniß nm'' : mo ist aber constant, denn es ist das Verhältniß der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in beiden Mitteln, also ist auch das Verhältniß sin. nmm'' : sin. mm''o constant. ∢ nmm'' ist = ∢ amp = dem Einfallswinkel, weil beide mit ∢ pmn = 1 R., und ∢ mm''o = ∢ qmo = dem Brechungswinkel, weil △ qmo ∽ △ omm'' ist. Es ist also auch das Verhältniß von dem Sinus des Einfallswinkels zu dem Sinus des Brechungswinkels constant.

§. 233. Beobachtungen des Jesuiten Grimaldi; Versuche Young's. Der Jesuit Grimaldi fand im Jahre 1665, 1) daß, wenn man durch eine feine Oeffnung einen Sonnenstrahl in ein dunkles Zimmer eindringen läßt, und diesem Strahle einen schmalen Körper aussetzt, alsdann der Schatten dieses Körpers breiter ist, als man nach der gradlinigen Verbreitung der Lichtstrahlen erwarten sollte; 2) daß, wenn man die durch die feine Oeffnung eindringenden Strahlen auf einer weißen Fläche auffängt, ebenso der erleuchtete Raum größer ist, als ihn die geometrische Construction gibt. Auch beobachtete er farbige Säume sowohl im Schatten des schmalen Körpers, als auch an dem Umfange des erleuchteten Flecks, und schrieb diese Erscheinung einer Ablenkung von dem gradlinigen Wege zu, welche die Lichtstrahlen erleiden, wenn sie an den Rändern undurchsichtiger Körper vorübergehen. Er nannte diesen Vorgang Diffraction, Beugung, Inflexion. 3) Grimaldi ließ die Sonnenstrahlen durch zwei feine, nahe bei einander stehende Oeffnungen in ein dunkles Zimmer eintreten, und fing sie auf einem Papierblatt in solcher Entfernung auf, daß die von den beiden Oeffnungen herrührenden hellen Kreise theilweise über einander fielen. Die durch das Licht beider Oeffnungen erleuchtete Stelle war allerdings heller, als die Stellen, welche nur von einer Oeffnung Licht empfingen, doch fand er an den Grenzen dieses stärker erleuchteten Raumes dunkle Streifen an solchen Stellen des Schirms, welche offenbar noch Licht von beiden Oeffnungen empfingen, und dennoch waren diese Streifen dunkler, als diejenigen Stellen des Papierschirms, welche nur von einer Oeffnung beleuchtet waren. Diese dunkeln Linien verschwanden, sobald die eine Oeffnung zugehalten wurde. Grimaldi schloß aus dieser Erscheinung, daß ein erleuchteter Körper dunkler werden kann, wenn neues Licht zu demjenigen hinzukommt, welches ihn schon erleuchtet, und suchte sich dies durch die Annahme von Lichtwellen zu erklären.

Grimaldi's Beugungsversuche wurden vielfach wiederholt und abgeändert, namentlich auch von Newton, aber die von ihm ausgesprochene Idee, daß Dunkelheit durch das Zusammenwirken zweier Lichtstrahlen entstehen könne, blieb lange unbeachtet. Erst Young (1800) nahm diesen Gegenstand wieder auf. Er beobachtete die hellen und dunklen Streifen, welche hinter einem schmalen Körper entstehen, wenn man ihn den von einem leuchtenden Punkte oder einer schmalen Lichtlinie ausgehenden Strahlen aussetzt, und fand, daß diese Streifen alsbald verschwinden, sobald man das Licht an der einen Seite des schmalen Körpers vorbeizugehen hindert. Er hatte also durch diesen Versuch ebenfalls dargethan, daß zwei Lichtstrahlen, welche sehr nahe nach einerlei Richtung fortgehen, bei ihrem Zusammentreffen nicht immer zur Verstärkung der Erleuchtung beitragen, sondern daß sie sich unter

Digitized by Google

Umſtänden verſtärken, oder ihre Wirkung gegenſeitig vernichten können. Er nannte daher dieſe gegenſeitige Einwirkung der Lichtſtrahlen auf einander Interferenz (to interfere, ſich einmiſchen). Young zeigte auch, daß der Weg, welchen die Lichtſtrahlen durchlaufen, um von der Lichtquelle zu einem Punkte hinter dem ſchmalen Körper zu gelangen, welcher nicht grade in der Mitte des geometriſchen Schattens liegt, ungleich iſt, je nachdem ſie auf der einen oder der anderen Seite des ſchmalen Körpers vorbeigehen. Wenn ſich alſo das Licht durch eine Wellenbewegung fortpflanzt, ſo begreift man ſehr wohl, wie die beiden Lichtſtrahlen, welche in einem Punkte hinter dem Schatten gebenden Körper zuſammentreffen, hier je nach der Differenz der durchlaufenen Wege bald mit gleichen, bald mit entgegengeſetzten Schwingungszuſtänden ankommen, ſich alſo gegenſeitig verſtärken oder aufheben können.

§. 234. **Fresnel's Spiegelverſuch.** Wollte man die Beugung des Lichtes und alle damit zuſammenhängenden Erſcheinungen durch das Princip der Interferenzen erklären, ſo war zu wünſchen, ſolche Interferenzen auch ohne Beugung hervorzubringen. Fresnel gelang dieſes auf folgende Weiſe. Er ſtellte zwei ebene Metallſpiegel ſo neben einander auf, daß ſie in einer verticalen geraden Linie zuſammenſtießen. Der Winkel, welchen die beiden Spiegelebenen mit einander machten, war nur wenig kleiner, als 180° (ſo daß die beiden Bilder einer ungefähr 8 bis 10 Schritte entfernten Kerzenflamme nur um den Durchmeſſer dieſer Kerzenflamme von einander getrennt erſcheinen). Brachte er nun in einige Entfernung von den Spiegeln einen leuchtenden Punkt, ſo entſtanden zwei Spiegelbilder desſelben. Dieſe beiden Bilder fielen ſehr nahe zuſammen, weil die Spiegelebenen faſt zuſammenfielen. In einiger Entfernung von den Spiegeln trafen nun die reflectirten Strahlen zuſammen, und bildeten dadurch abwechſelnd helle und dunkle verticale Streifen. Pouillet wendet zu dem Verſuche ſtatt Interferenzſpiegel ein Interferenzprisma (ein Prisma, deſſen brechender Winkel nur wenig kleiner, als 180° iſt) an. Die Streifen ſind meiſtens zu fein, um mit bloßem Auge wahrgenommen werden zu können, man beobachtet ſie daher mit einer Lupe. Bringt man vor das Auge ein ziemlich homogenes, z. B. rothes, Glas, ſo ſieht man nur abwechſelnd helle und dunkle Streifen; wendet man dagegen kein homogenes, ſondern nur weißes Licht an, ſo erſcheinen die Streifen mit verſchiedenen Farben geſäumt.

Digitized by Google

Fig. 63.

§. 235. Erklärung der Fresnel'schen Interferenzstreifen. a b und b c (Fig. 63) seien die beiden Spiegel, b die Kante, in welcher sie zusammenstoßen, p der leuchtende Punkt, p′ und p″ die beiden Spiegelbilder desselben. Beschreibt man nun mit einem beliebigen Radius p′q′ und von p′ als Mittelpunkt einen Kreisbogen, so haben alle von b c reflectirten Strahlen, wie z. B. r′q′ oder m′n′ bis zu dem Punkte, wo sie den Kreisbogen schneiden, einen gleich großen Weg von der Lichtquelle zurückgelegt. Dieser Weg ist z. B. für den Strahl $r'q' = pr' + r'q' = p'r' + r'q' = p'q'$ und für den Strahl $m'n' = pm' + m'n' = p'm' + m'n' = p'n'$; p′q′ und p′n′ sind aber als Halbmesser desselben Kreisbogens einander gleich. Alle Aethertheilchen auf dem Kreisbogen, wie q′, n′, welche durch die von b c reflectirten Strahlen in Schwingung versetzt werden, befinden sich also in gleichen Schwingungszuständen. Man beschreibe jetzt auch von p″ als Mittelpunkt mit einem Radius $p''q'' = p'q'$ einen Kreisbogen. Beide Kreisbögen durchschneiden sich in q′q″. Der Strahl p r″ wird von dem Spiegel a b nach r″q″ reflectirt, sein Weg ist $= pr'' + r''q'' = p''r'' + r''q'' = p''q'' = p'q'$. Das Aethertheilchen in q′q″ befindet sich durch die zwei Strahlen r′q′ und r″q″ in ganz gleichen Schwingungszuständen, folglich wird die Oscillationsamplitüde desselben vergrößert, und in q′q″ muß verstärkte Lichtwirkung eintreten. Mit q″ in gleichem Schwingungszustande befinden sich aber auch alle Aethertheilchen auf dem Bogen y y′, welche durch die von a b reflectirten Strahlen in Schwingungen versetzt werden. Nun beschreibe man von p′ einen Kreisbogen z z′ mit einem Halbmesser $p't' < p'q'$, und zwar sei $p'q' - p't' = \frac{1}{2}$ Wellenlänge. z z′ schneidet y y′ in t′t″. Der Weg $ps' + s't' = p's' + s't' = p't'$ ist also $= ps'' + s''t'' - \frac{1}{2}$ Wellenlänge $= p''t'' - \frac{1}{2}$ Wellenlänge. Das Aethertheilchen in t′t″ wird demnach durch den einen Strahl gerade in den entgegengesetzten Schwingungszustand versetzt, wie durch den anderen; folglich wird die Wirkung des einen durch die Wirkung des anderen aufgehoben, das Theilchen bleibt in Ruhe, und in t′t″ ist es dunkel. Jetzt beschreibe man von p″ einen Kreisbogen u u′ mit einem Halbmesser $p''n'' = p''q''$

Digitized by Google

— ½ Wellenlänge, dieser durchschneidet x x′ in n′n″. Es kann nun wieder gerade so gezeigt werden, daß es in n′n″ dunkel sein muß. Werden nun die concentrischen Bögen sowohl um p′, als auch um p″, so gezogen, daß der Halbmesser jedes folgenden immer um ½ Wellenlänge kleiner ist, als derjenige des vorhergehenden, so läßt sich leicht nachweisen, daß in allen Punkten, in welchen sich zwei ausgezogene oder zwei punktirte Bögen schneiden, das Zusammenwirken der beiden Wellensysteme eine Vermehrung der Lichtintensität zur Folge hat, während an allen Stellen, wo sich ein ausgezogener und ein punktirter Kreis schneidet, gar keine Vibrationen stattfinden, also Dunkelheit herrscht.

§. 236. **Fortsetzung; Erscheinung bei verschiedenfarbigem Lichte.** Betrachtet man die Streifen durch ein rothes Glas, so sind sie breiter, als wenn man ein grünes anwendet. Daraus folgt aber, daß die Wellenlänge für die rothen Strahlen größer ist, als für die grünen. Ueberhaupt sind die Wellenlängen für die farbigen Strahlen um so kürzer, je brechbarer diese Strahlen sind. Da die hellen und dunklen Streifen für die verschiedenfarbigen Strahlen nicht genau an dieselben Stellen fallen, so können die Streifen bei Anwendung von weißem Lichte auch nicht rein weiß und schwarz erscheinen, sondern sie müssen farbige Säume zeigen.

Fresnel entwickelte nun auch nach Anregung Young's auf die Wellentheorie gestützt eine Theorie der Beugungserscheinungen, welche durch Fraunhofer, Herschel und Schwerd noch weiter ausgebildet, ja vollendet wurde. Fresnel untersuchte und erklärte alle Beugungserscheinungen, welche durch einen ganz schmalen Spalt oder durch einen ganz schmalen undurchsichtigen Körper hervorgebracht werden. Fraunhofer bereicherte die Wissenschaft durch die Untersuchung der durch Gitter hervorgebrachten Erscheinungen. Herschel begann die Phänomene zu untersuchen, welche sowohl durch eine, als auch durch mehrere dreieckige, quadratische und kreisförmige Oeffnungen hervorgebracht werden. Schwerd endlich gab eine vollständige Erklärung aller Beugungserscheinungen, welche man durch Oeffnungen von beliebiger Form, von beliebiger Zahl und gegenseitiger Stellung beobachtet.

§. 237. **Verschiedene Beugungserscheinungen.** Wenn man durch einen schmalen Spalt nach einer Lichtlinie hinsieht, und zwar für den Fall, daß man nicht weißes, sondern einfarbiges Licht, z. B. rothes, anwendet, so sieht man in der Mitte der ganzen Erscheinung einen sehr hellen Streifen, welchem zu beiden Seiten, immer durch dunkle Zwischenräume von einander getrennt, andere folgen, deren Lichtstärke sehr merklich abnimmt, je weiter sie von der Mitte entfernt sind. Nach Fraunhofer nennt man diese Seitenbilder Spectra erster Ordnung (vergl. §. 245); sie werden um so schmäler, je weiter die Oeffnung ist, weßhalb sie auch bei einigermaßen breiten Spalten mit unbewaffnetem Auge nicht mehr sichtbar sind. Für rothes Licht erscheinen diese Streifen breiter, als für andere Farben.

Durch eine kreisförmige Oeffnung sieht man einen hellen Fleck mit concentrischen Ringen umgeben, durch eine dreieckige Oeffnung sieht man einen sechsseitigen Stern.

§. 238. **Erklärung der Beugungserscheinungen, welche man durch eine Oeffnung beobachtet.** Wenn das Licht von einem hinlänglich weit entfernten Punkte senkrecht auf die Ebene eines Schirmes fällt, in welchem sich die Oeffnung befindet, so kann man alle in dieser Oeffnung befindlichen

Digitized by Google

Aethertheilchen als gleichweit von der Lichtquelle entfernt betrachten, alle diese Aethertheilchen befinden sich also in gleichen Schwingungszuständen. Jedes dieser Theilchen pflanzt aber seine Vibrationen jenseits des Schirmes nach allen Seiten hin fort, als ob es ein selbstleuchtendes Theilchen wäre. Die Stärke der Erleuchtung an irgend einem hinter dem Schirme gelegenen Punkte hängt also nur davon ab, welche Wirkung durch die Interferenz aller in diesem Punkte zusammentreffenden, von den verschiedenen Punkten der Oeffnung ausgehenden Strahlen hervorgebracht wird. Wenn man nun die enge Oeffnung dicht vor das Auge hält, so werden nur solche Strahlen, welche von den verschiedenen Punkten der Oeffnung unter einander parallel ausgehen, in demselben Punkt der Netzhaut vereinigt, und bringen eine Wirkung auf den Sehnerv hervor; wir haben also nur zu untersuchen, unter welchen Umständen alle Elementarstrahlen eines solchen parallelen Strahlenbündels sich gegenseitig vernichten oder unterstützen. Eben so kommen bei der Beobachtung durch ein Fernrohr auch nur diejenigen Strahlen zur Interferenz, welche als paralleler Strahlenbündel von der Oeffnung auf das Objectiv fallen, denn alle Strahlen eines solchen Bündels werden in der Brennweite des Objectivs in einem Punkte vereinigt, und die sich hier bildende Erscheinung wird dann durch das Ocular betrachtet. Wenn man endlich die Beugungserscheinung auf einem Schirme auffängt, so kommen an jeder Stelle dieses Schirmes nur solche Strahlen zur Interferenz, welche von den verschiedenen Punkten der Oeffnung nach einem und demselben Punkte des Schirmes convergiren. Die Convergenz der interferirenden Strahlen nimmt aber natürlich um so mehr ab, je weiter der Schirm von der Oeffnung entfernt wird. Die Erscheinung, wie man sie mit unbewaffnetem Auge oder durch ein Fernrohr wahrnimmt, entspricht also dem Falle, daß der Schirm im Vergleich zur Größe der Oeffnung sehr weit von derselben entfernt ist. Für alle 3 Arten der Beobachtung brauchen wir also nur die parallelen Strahlenbündel und die gegenseitige Interferenz der sie bildenden Elementarstrahlen näher zu untersuchen.

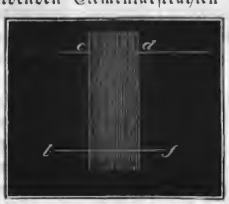


Fig. 64.

§. 239. **Fortsetzung.** Betrachten wir zuerst ein solches Strahlenbündel, welches sich rechtwinklig zu der Oeffnung cd, (Fig. 64) also in der Richtung der einfallenden Strahlen, auch jenseits der Oeffnung fortpflanzt. Da alle Aethertheilchen in der Oeffnung cd sich in gleichen Schwingungszuständen befinden, so wird dies auch für alle Aethertheilchen der Fall sein, welche auf einer graden Linie bf liegen, die auf der Richtung der Strahlen rechtwinklig steht. Die Strahlen dieses Bündels werden sich also gegenseitig unterstützen. Sie werden deßhalb bei ihrer Vereinigung in einem Punkte der Netzhaut oder in der Brennweite des Objectivs eine Vibrationsintenstität erzeugen, welche der Summe der Vibrationsintensitäten aller elementaren Strahlen gleich ist. Ein so **vollständiges Zusammenwirken findet für kein anderes, von cd ausgehendes Strahlenbündel statt.**

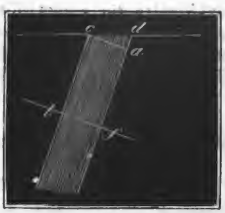


Fig. 65.

Wenn das von der Oeffnung c d (Fig. 65) ausgehende Strahlenbündel so gegen die Oeffnung geneigt ist, daß, wenn man c a senkrecht auf d f zieht, d a = ½ Wellenlänge ist, so werden die entsprechenden Punkte der von c und d ausgehenden Randstrahlen, wie z. B. b und f, sich stets in entgegengesetzten Schwingungszuständen befinden, diese beiden Randstrahlen werden also ihre Wirkung gegenseitig vernichten. Von allen übrigen Elementarstrahlen des Bündels kann aber keiner den anderen vollständig vernichten. Es muß demnach durch dieses Bündel eine Lichtwirkung stattfinden. Die Wirkung kann keine volle sein, weil wenigstens ein gegenseitiges theilweises Aufheben stattfindet, weßhalb auch die Intensität dieses Bündels ungefähr 0,4 von der Intensität des ungebeugten Bündels ist.

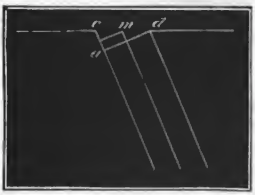


Fig. 66.

Ist der Gangunterschied der Randstrahlen = 2 halbe Wellenlängen, so kann man sich die Breite der Oeffnung in 2 gleiche Theile getheilt denken. Der von d (Fig. 66) ausgehende Randstrahl ist alsdann von dem von der Mitte m ausgehenden in seinem Gange um eine halbe Wellenlänge verschieden, beide Strahlen werden also ihre Wirkung gegenseitig vernichten. Derselbe Gegensatz findet aber auch zwischen dem ersten, zweiten, dritten u. s. w. Strahle des von der einen Hälfte der Oeffnung ausgehenden Strahlenbündels und den entsprechenden Strahlen des von der anderen Hälfte ausgehenden Strahlenbündels statt. Die Totalwirkung ist also in diesem Falle gleich Null.

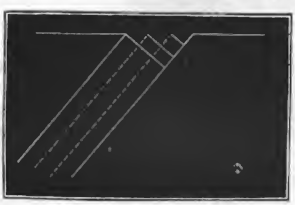


Fig. 67.

Sind die Randstrahlen um 3 halbe Wellenlängen in ihrem Gange verschieden, so kann man sich das ganze Strahlenbündel in 3 gleiche Theile getheilt denken, und es findet dann zwischen den entsprechenden Strahlen der beiden ersten Drittel ein vollkommener Gegensatz statt, sie vernichten sich also gegenseitig, und nur die Strahlen des letzten Drittels bringen eine Wirkung hervor. Die Vibrationsintensität, welche durch dieses letzte Drittel hervorgebracht wird, ist offenbar 3 mal schwächer, als in dem Falle, wo der Gangunterschied der Randstrahlen = ½ Wellenlänge war, weil nur der dritte Theil der Elementarstrahlen zur Wirkung gelangt. Deßwegen ist die Lichtintensität 3^2 oder 9 mal geringer, als in dem erwähnten Falle.

Beträgt der Gangunterschied der Randstrahlen 4 halbe Wellenlängen, so ist die Lichtintensität, welche durch das Zusammenwirken aller Strahlen dieses Bündels hervorgebracht wird, abermals gleich Null.

Auf dieselbe Weise kann man weiter schließen, und man wird finden, daß die Totalwirkung aller Strahlen eines gebeugten Bündels jedesmal

Digitized by Google

$= 0$ ist, wenn die Differenz im Gange der Randstrahlen ein grades Vielfaches einer halben Wellenlänge beträgt. So oft aber der Gangunterschied der Randstrahlen ein ungrades Vielfaches einer halben Wellenlänge ist, wird immer noch ein Theil der Strahlen zur Wirkung kommen, allein diese Wirkung ist um so geringer, je größer der Gangunterschied der Randstrahlen wird.

§. 240. **Fortsetzung.** Der Gangunterschied der Randstrahlen eines gebeugten Strahlenbündels hängt offenbar von dem Winkel ab, welchen das gebeugte Strahlenbündel mit der Richtung der einfallenden Strahlen macht. So lange die Ablenkungswinkel klein sind, wie dies bei den Versuchen nur der Fall ist, kann man den Gangunterschied der Randstrahlen ohne merklichen Fehler dem Ablenkungswinkel proportional setzen, weil für so kleine Winkel die Sinus (Gangunterschiede) mit den Bögen zusammenfallen. Wenn also für einen Ablenkungswinkel b die Differenz im Gange der Randstrahlen 2 halbe Wellenlängen beträgt, so wird diese Differenz 4, 6, 8 u. s. w. halbe Wellenlängen betragen, wenn der Ablenkungswinkel 2b, 3b, 4b u. s. w. ist. Daraus folgt nun, daß in dem durch einen engen Spalt erzeugten Beugungsbilde in der Mitte ein heller Streifen sichtbar sein muß, auf welchen zu beiden Seiten eine Reihe heller und dunkler Streifen in der Weise auf einander folgen, daß je 2 Minima der Lichtstärke immer um gleiche Winkelabstände von einander entfernt sind. Ist die Entfernung des ersten dunklen Streifens von der Mitte des Bildes auf jeder Seite $= n$, so ist die Entfernung des zweiten, dritten u. s. w. $= 2n$, $3n$ u. s. w.; also der Zwischenraum zwischen je 2 dunkeln Streifen stets $= n$, die Entfernung des ersten dunkeln Streifens auf der linken Seite von dem ersten auf der rechten ist dagegen $= 2n$, da ja die Entfernung eines jeden von der Mitte $= n$ ist. Zwischen je 2 dunkeln Streifen liegen die hellen Stellen des Bildes. Alle Seitenspectra sind also gleich breit, weil die sie begrenzenden dunkeln Streifen in gleichen Abständen auf einander folgen. Nur das Mittelbild ist doppelt so breit, als alle übrigen.

Bisher haben wir immer nur **homogenes Licht** vorausgesetzt. Es ist indessen schon erwähnt, daß die Spectra für die verschiedenen Farben nicht gleiche Breite haben, und daraus geht hervor, daß bei Anwendung von weißem Lichte die Maxima und Minima der Lichtstärke für die verschiedenen Farben nicht zusammenfallen. Man wird also an keiner Stelle des Beugungsbildes vollkommene Dunkelheit wahrnehmen, und auch an keiner Stelle, die Mitte ausgenommen, Weiß erblicken. Ueberall sieht man Farbentöne, in welchen diejenigen Farben vorherrschen, welche an dieser Stelle grade einen hellen Streifen bilden, während grade diejenigen Farben fehlen, welche hier im Minimo sind.

Fig. 68.

§. 241. **Bestimmung der Wellenlänge.** Schwerd hat durch Messung mit einem Theodolithen für rothes Licht und einen Spalt, welcher 1,353 Millimeter breit war, als Winkelabstand zweier auf einander folgenden dunkeln Streifen im Mittel einen Winkel von 1′ 38,1″ gefunden. Mit Hilfe dieser Werthe ist man nun im Stande, sehr leicht die Wellenlänge für rothes Licht zu berechnen.

Digitized by Google

Es sei abmn (Fig. 68) das Strahlenbündel, welches dem ersten dunkeln Streifen entspricht, so ist ac = einer Wellenlänge für rothes Licht. In dem rechtwinkligen Dreieck abc ist aber ab bekannt, nämlich = 1,353 Millimeter, und ebenso ∢abc = 0° 1′ 38,1″. Nun ist aber $\frac{ac}{ab}$ = sin. abc, folglich ac = ab × sin. abc = 1,353 × sin. 0° 1′ 38,1″ = 0,000643 Millimeter. Die Länge der Lichtwelle läßt sich sogar ohne Anwendung der trigonometrischen Linien berechnen. Man denke sich um b als Mittelpunkt mit dem Halbmesser ab = 1,353 einen Kreis gezogen, so kann ac wegen der Kleinheit von ∢abc als Bogen desselben betrachtet werden. Nun verhalten sich aber bei demselben Kreise die Bögen wie die zugehörigen Centriwinkel, also ∢ 180° : ∢ 0° 1′ 38,1″ = 3,14 . . × 1,353 : x, oder, wenn die Winkel in Secunden ausgedrückt werden, 648000 : 98,1 = 3 14 . . × 1,353 : x.

Da für die anderen farbigen Strahlen die Streifen näher zusammenrücken, so findet man auch für die Wellenlänge dieser Strahlen kleinere Werthe, als für rothes Licht. So ist sie z. B. für violettes Licht in der Nähe des Fraunhofer'schen Streifens H nur = 0,000396 Millimeter.

§. 242. **Einfluß der Weite der Oeffnung auf die Breite der Spectra.** Wenn man die Wellenlänge mit l, die Weite des Spalts mit g und den Winkelabstand des ersten dunkeln Streifens von der Mitte des Bildes mit b bezeichnet, so ist nach §. 241 l = g . sin. b und für einen anderen Spalt l = g′ . sin b′, also g . sin. b = g′. sin. b′ und sin. b : sin. b′ = g′ : g, d. h. die Sinusse der Ablenkungswinkel, oder, was dasselbe ist, die Breiten der Seitenspectra sind den Weiten der Oeffnungen umgekehrt proportional. Auch dieses Gesetz ist durch die Versuche Schwerd's bestätigt.

§. 243. **Bestimmung der Schwingungszahlen für verschiedenfarbiges Licht.** Die Schwingungszahlen lassen sich aus der gefundenen Wellenlänge und der bekannten Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts leicht berechnen. Man hat offenbar nur letztere durch erstere zu dividiren. Wir wollen diese Berechnung für das Roth, dessen Wellenlänge = 0,000643 Millimeter ist, ausführen. Da 10000 Meter = 1,34768 deutsche Meilen sind, so sind 42000 deutsche Meilen über 311000000 Meter, und diese durch 0,000643 Millimeter dividirt, gibt über 483 Billionen. So viele Schwingungen macht also dieses rothe Licht in einer Secunde. Für das äußerste Roth des Spectrums findet man 458 Billionen, und für das äußerste Violett 727 Billionen.

§. 244. **Beugungserscheinungen durch mehrere neben einander liegende Oeffnungen und Erklärung derselben.** Wenn zwei oder mehrere gleiche beugende Oeffnungen neben einander stehen, so erscheint im Wesentlichen dieselbe Beugungsfigur, welche man auch durch eine dieser Oeffnungen beobachtet haben würde; nur erscheint die Hauptfigur von vielen schwarzen Streifen durchschnitten. Sind es 2 Oeffnungen, so sehen wir, daß die Spectra erster Ordnung, welche eine solche Oeffnung hervorgebracht hätte, durch diese schwarzen Streifen in mehrere kleinere Spectra abgetheilt sind. Besonders scharf und deutlich sind diese Spectra in dem mittleren Theile der Figur.

Digitized by Google

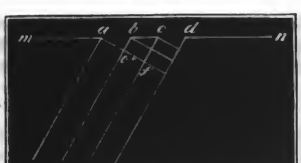


Fig. 69.

Es sei mn (Fig. 69) ein Schirm mit 2 Oeffnungen, welche gleich weit, und deren Abstand bc von einander ebenfalls gleich der Weite einer Oeffnung sei. Wir brauchen aus den oben angegebenen Gründen natürlich wieder nur solche Strahlenbündel zu berücksichtigen, welche in paralleler Richtung von den beiden Oeffnungen ausgehen. Wenn nun die Ablenkung der gebeugten Strahlenbündel grade eine solche ist, daß die Elementarstrahlen eines jeden Bündels sich schon unter einander selbst vernichten, so wird auch durch das Zusammenwirken der beiden Strahlenbündel kein Licht erzeugt werden können. Die dunkeln Stellen also, welche man in dem Beugungsbilde beobachtet, wenn bloß eine Oeffnung vorhanden ist, werden auch dunkel bleiben, wenn zu der ersten Oeffnung noch eine zweite hinzukommt. Die hellen Streifen im Beugungsbilde einer Oeffnung werden hingegen durch das Hinzukommen der zweiten nicht so ganz unverändert bleiben können, denn es kann ja der Fall eintreten, daß jedes der beiden Strahlenbündel für sich allein eine bestimmte Vibrationsintensität erzeugen, also eine helle Stelle im Beugungsbilde hervorbringen würde, daß aber zwischen den beiden Bündeln ein vollkommner Gegensatz stattfindet, so daß beide ihre Wirkung gegenseitig vernichten. Es ist demnach klar, daß durch das Hinzutreten der zweiten Oeffnung an solchen Stellen dunkle Streifen entstehen können, welche im Beugungsbilde einer Oeffnung hell erscheinen, also Streifen, welche die Spectra erster Klasse durchschneiden. Es fragt sich nur, an welchen Stellen diese neuen schwarzen Streifen auftreten müssen. Diejenigen Strahlenbündel, welche sich rechtwinklig zur Oeffnung, also ungebeugt, fortpflanzen, sind in ihrem Gange vollkommen übereinstimmend, sie werden sich also unterstützen, und die Mitte des ganzen Bildes bleibt vor wie nach hell. Nehmen wir aber den Gangunterschied der Randstrahlen derselben Oeffnung oder $be = \frac{1}{4}$ Wellenlänge, dann ist bei unserer Voraussetzung $cf = \frac{1}{2}$ Wellenlänge, folglich der Randstrahl a und der Randstrahl c in entgegengesetzten Schwingungszuständen, und ebenso jeder auf a folgende Elementarstrahl mit dem entsprechenden, auf c folgenden. Die Wirkung des einen Strahlenbündels wird also durch die Wirkung des anderen aufgehoben. Es entsteht demnach ein dunkler Streifen. Ebenso wird nachgewiesen, daß, wenn der Gangunterschied der Randstrahlen derselben Oeffnung bei unserer Voraussetzung $\frac{3}{4}$, $\frac{5}{4}$, $\frac{7}{4}$, $\frac{9}{4}$ u. s. f. Wellenlängen beträgt, ebenfalls neue dunkle Streifen entstehen müssen, welche in dem Beugungsbilde einer einzigen Oeffnung nicht vorhanden sind.

§. 245. **Fortsetzung.** Da bei dem Beugungsbilde durch eine Oeffnung der erste dunkle Streifen dahin fällt, wo die Ablenkung des Strahlenbündels = 1 Wellenlänge, und der zweite, wo sie = 2 Wellenlängen ist, und da nach dem vorhergehenden §. bei 2 Oeffnungen auch dunkle Streifen entstehen, wenn diese Ablenkung $\frac{5}{4}$ und $\frac{7}{4}$ Wellenlänge beträgt, so geht daraus hervor, daß durch diese neuen dunkeln Streifen jedes Seitenspectrum erster Klasse in 3 Theile getheilt wird, von welchen immer der mittlere doppelt so breit ist, als die beiden anderen. Da aber auch bei $\frac{1}{4}$

Digitized by Google

und $\frac{3}{4}$ auf jeder Seite dunkle Streifen entstehen, so haben wir also deren im Mittelbilde 4, oder das Mittelbild wird in 5 Theile getheilt, von welchen die 3 mittleren gleich breit, und zwar doppelt so breit, als die beiden äußeren sind. Nennen wir die Zwischenräume zwischen je 2 dieser neuen dunkeln Streifen Spectra zweiter Klasse, so sehen wir, daß die Spectra zweiter Klasse theils in die Mitte der Spectra erster Klasse fallen, theils aber durch die dunkeln Linien halbirt werden, welche je 2 Spectra erster Klasse von einander trennen.

Es bleibt jetzt nur noch die Intensität des Lichtes an den verschiedenen Stellen des Beugungsbildes zu bestimmen. In der Mitte des ganzen Bildes, und überall da, wo die Mitte eines Spectrums zweiter Klasse mit der Mitte eines Spectrums erster Klasse zusammenfällt, ist der Gang der von beiden Oeffnungen kommenden Strahlenbündel vollkommen harmonirend; sie werden also hier eine Vibrationsintensität hervorbringen, welche doppelt so groß ist, als für eine Oeffnung. Die Lichtstärke ist also an dieser Stelle 4 mal größer, als wenn nur eine solche Oeffnung da wäre. An den Zwischenstellen hingegen hat im Ganzen die Lichtstärke bedeutend abgenommen.

Sind noch mehr, als 2 Spalten neben einander, so wird die Anzahl der schwarzen Streifen, welche die Spectra erster Klasse durchschneiden, noch vermehrt, und dadurch entstehen die Spectra dritter Klasse. Wären z. B. 4 gleich weite Spalten, von welchen jede von der anderen um die Weite einer Spalte absteht, neben einander, so würden bei einer Ablenkung der Randstrahlen desselben Spaltes von $\frac{1}{4}$, $\frac{2}{4}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{4}{4}$ u. s. w. Wellenlänge neue dunkle Streifen entstehen. Dadurch würde aber fast alles Licht zwischen $\frac{1}{4}$ und $\frac{3}{4}$, ferner zwischen $\frac{5}{4}$ und $\frac{7}{4}$ verschwinden. Der Lichtstreifen in der Mitte des Bildes, ferner die Reste der Spectra zweiter Klasse bei $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$ u. s. w. würden also immer schmäler werden. Dagegen würde grade hier die Intensität des Lichtes wieder 4 mal größer sein, als bei nur 2 Spalten, weil die doppelte Anzahl der Oeffnungen hier die doppelte Vibrationsintensität hervorbringt.

§. 246. **Beugungserscheinungen durch Gitter.** Aus dem Vorhergehenden erhellt, daß die Lichtstreifen immer schmäler und lichtstärker werden, und daß das Licht der zwischenliegenden Stellen immer mehr verschwindet, je größer die Anzahl der Oeffnungen wird. Dadurch erklären sich nun die von Fraunhofer zuerst beobachteten Beugungserscheinungen, welche durch Gitter, d. h. durch eine Reihe paralleler schmaler Spalten hervorgebracht werden. Setzt man ein solches Gitter vor ein Fernrohr, und sieht man nach einer Lichtlinie, welche den Spalten parallel ist, so beobachtet man bei Anwendung von homogenem, z. B. rothem, Lichte, in der Mitte das schmale Bild der Lichtlinie, und zu beiden Seiten durch ziemlich große Zwischenräume davon getrennt, einfarbige helle Lichtstreifen. Wenn man auch an anderen dazwischen liegenden Stellen noch schmale Streifen wahrnehmen kann, so sind sie doch im Vergleich zu den eben erwähnten sehr lichtschwach. Für violettes Licht rücken die entsprechenden Lichtstreifen der Mitte des Bildes in dem Verhältniß näher, in welchem die violetten Lichtwellen kürzer sind, als die rothen.

Wenn man weißes Licht anwendet, so sieht man in der Mitte das directe Bild der Lichtlinie, und zwar weiß, weil ja hier die Maxima aller Farben zusammenfallen; auf beiden Seiten dieser Lichtlinie sind ganz dunkle

Digitized by Google

Räume; auf diese folgt ein dem prismatischen Spectrum ähnliches Farbenband, dessen violettes Ende nach Innen gekehrt ist. Darauf folgt nach einem zweiten, ganz dunkeln Zwischenraume ein zweites breiteres Farbenband, dessen rothes Ende über das violette Ende eines dritten Farbenbandes fällt.

Durch feinere Gitter sieht man die Spectren schon sehr schön mit bloßem Auge, ja man kann durch hinlänglich feine Gitter auf diese Weise selbst mehrere der Fraunhofer'schen Linien erkennen.

Wir haben auch hier bei den Gittern vorausgesetzt, daß die dunkeln Zwischenräume des Gitters so breit sind, wie die Spalten. Tritt diese Voraussetzung nicht ein, so werden sich natürlich die Beugungsbilder anders gestalten.

Aus den Erscheinungen, welche durch einfache Gitter erzeugt werden, erklärt sich auch die prachtvolle Erscheinung, welche man beobachtet, wenn man vor dem Objectiv des Fernrohrs zwei solche Gitter kreuzt, und nach einem Lichtpunkte hinsiehet. Die Mitte der Erscheinung nimmt das weiße Bild des Lichtpunktes ein, welches von einer Menge von Farbenbildern umgeben ist, die ihr violettes Ende nach Innen kehren. Aehnliche Erscheinungen beobachtet man, wenn man ein Stück Mousselin, Flor oder Seidenband vor das Fernrohr bringt. Auch die schönen Farbenbilder, welche man gewahr wird, wenn man durch die Fahne einer Vogelfeder nach einem Lichtpunkte sieht, gehören hierher. Ebenso die Glorie von mehreren farbigen Ringen, welche man um die Flamme eines Kerzenlichtes erblickt, wenn man nach demselben durch ein mit einem feinen Staube (semen lycopodii) bestreutes Glas hinsieht.

Feine Gitter zeigen bei reflectirtem Lichte ähnliche Farbenerscheinungen, wie bei durchgelassenem; dadurch erklärt sich das schöne Farbenspiel fein gestreifter Oberflächen, z. B. der Perlmutter.

§. 247. **Farben dünner Blättchen.** Jeder durchsichtige Körper erscheint lebhaft gefärbt, wenn er nur hinlänglich dünne Schichten bildet (Seifenblasen; die Flitterchen einer vor der Glasbläserlampe bis zum Zerplatzen aufgeblasenen Glaskugel; wenn sich ein Tropfen Terpentinöl auf einer Wasserfläche ausbreitet; das Anlassen des Stahls, wobei sich der Stahl allmählig mit einer Oxydschicht überzieht). Auch dünne Schichten von Luft bringen solche Farben hervor, wie man oft an Sprüngen in etwas dicken Glasmassen sieht. In der größten Regelmäßigkeit zeigen sich diese Farben in Form von Ringen, wenn man eine convere Glaslinse von großer Brennweite auf eine ebene Glastafel legt (Newton'sche Farbenringe). Da, wo die Linse die Glastafel berührt, sieht man im reflectirten Lichte einen schwarzen Fleck, welcher mit farbigen concentrischen Ringen umgeben ist, die nach Außen hin immer schmäler und matter werden. Die Farben folgen von der Mitte aus in folgender Ordnung: schwarz, bläulich weiß, gelblich weiß, bräunlich orange, roth, — violett, blau, gelblich grün, gelb, roth, — purpurroth, blau, gelblich grün, roth, carmoisinroth, — grünlich blau, blaßgrün, gelbgrün, roth, — u. s. w. Die äußeren Ringe sind abwechselnd blaßgrün und blaßroth, sie werden immer matter, so daß man in der Regel nur noch den achten oder neunten Ring unterscheiden kann.

§. 248. **Erklärung derselben.** Auch die Farben dünner Blättchen lassen sich, ebenso wie die Beugungserscheinungen, vollständig durch das Princip der Interferenz erklären. Wir setzen zuerst wieder homogenes Licht

Digitized by Google

voraus. Betrachtet man die Newton'schen Ringe bei Anwendung von homogenem Lichte, so sieht man nur abwechselnd helle und dunkle Ringe. Newton hat mit der größten Genauigkeit die Durchmesser der verschiedenen Ringe gemessen, und da ihm auch der Krümmungshalbmesser der Linse bekannt war, so konnte er die Dicke der Luftschicht an den verschiedenen Stellen berechnen. Auf diese Weise fand er das wichtige Resultat, daß für eine und dieselbe einfache Farbe die dunkelste Stelle des zweiten, dritten, vierten u. s. w. dunkeln Rings an solchen Stellen beobachtet wird, wo die Luftschicht 2, 3, 4 u. s. w. mal so dick ist, als an der dunkelsten Stelle des ersten dunkeln Ringes. Bezeichnet man diese letztere Dicke mit 2d, so erscheint, von der Mitte aus gerechnet, das erste Maximum des Lichtes da, wo die Dicke der Luftschicht = d ist. Das zweite, dritte u. s. w. Maximum entspricht den Dicken 3d, 5d, 7d u. s. w. Für verschiedene Farben sind wieder die Durchmesser der hellen und dunkeln Ringe nicht gleich; sie sind am größten für rothes Licht, am kleinsten für violettes. Demnach ist auch die absolute Dicke der Luftschicht, welche der Mitte des ersten hellen Ringes für verschiedene Farben des Spectrums entspricht, nicht gleich. Sie ist für das äußerste Roth = 0,000161 Millimeter, für das äußerste Violett = 0,000101.

Der Zwischenraum zwischen der ebenen Glastafel und der Linse nimmt nicht in demselben Verhältniß zu, wie die Entfernung von dem Berührungspunkte. Anfangs wächst dieser Zwischenraum langsam, dann rascher. Deßhalb sind die ersten Ringe auch breiter, als die folgenden. Bringt man die Erscheinung statt mit dem Newton'schen Apparate mit zwei ebenen Glasstreifen hervor, die sich am einen Ende berühren, und am anderen Ende dadurch, daß man einen ganz dünnen Körper, etwa ein Goldblatt oder ein Stückchen Stanniol dazwischen bringt, etwas von einander gehalten werden, dann nimmt die Dicke des Zwischenraums gleichförmig zu, dann erscheint aber auch ein Farbenstreifen grade so breit, wie der andere. Construirt man für einen solchen Apparat die Intensitätscurven für die verschiedenen Farben des Spectrums vertical über einander, so sieht man leicht ein, wie die Erscheinung bei Anwendung von weißem Lichte sich darstellen muß. Da an keinem Punkte alle Minima oder Maxima der Intensitätscurven vertical über einander liegen, so kann keine Stelle der immer dicker werdenden Luftschichte absolut dunkel, und auch keine ganz weiß erscheinen; es müssen überall Farben auftreten, und zwar weil an jeder Stelle mehrere Farben zusammenwirken, keine reine Farben des Spectrums, sondern Mischfarben. Welche Farbe an irgend einer Stelle der Platte erscheint, kann leicht gefunden werden, wenn man an der entsprechenden Stelle durch sämmtliche Intensitätscurven eine Verticale zieht. Dann sieht man, welchen Antheil jede einzelne Farbe an der hier auftretenden Färbung hat, und kann demnach die aus dem Zusammenwirken sämmtlicher Farben resultirende Farbe bestimmen.

§. 249. **Fortsetzung.** Die verschiedenen Farben des Spectrums zeigen, unter einander verglichen, sehr große Verschiedenheit hinsichtlich ihrer Lichtstärke. Die gelben Strahlen sind die leuchtendsten, die violetten sind am wenigsten leuchtend. Es geht daraus hervor, daß diejenigen Stellen der keilförmigen Luftschicht am hellsten erscheinen werden, an welchen Gelb im

Digitized by Google

Maximum ist; wo aber Gelb im Minimum ist, werden die dunkelsten Stellen sein. An diesen dunkeln Stellen erscheint die Schicht freilich nicht schwarz, sondern farbig, nur sind hier Farben von geringerer Leuchtkraft vorherrschend. Die Stellen der erwähnten Minima machen gleichsam Abtheilungen unter den auf einander folgenden Farben, nach denen man Farben von verschiedener Ordnung unterscheidet. Alle Farben der Schicht von ihrem dünnen Ende bis zu dem ersten dunkeln Streifen (dunkles Purpur) heißen Farben der ersten Ordnung, diejenigen der folgenden Abtheilung Farben der zweiten Ordnung u. s. w.

§. 250. **Fortsetzung.** Wir haben bisher nur die Farben dünner Luftschichten näher betrachtet; für andere durchsichtige Substanzen sind die Gesetze der Erscheinungen dieselben, nur ist die absolute Dicke der Schicht, welche einer bestimmten Farbe entspricht, je nach der Natur dieser Schicht veränderlich. Newton hat gezeigt, daß für verschiedene Substanzen die Dicke, welche derselben Farbe entspricht, sich umgekehrt verhält, wie die Brechungsexponenten dieser Substanzen. Erzeugt man z. B. auf die gewöhnliche Weise die Ringe durch Auflegen einer Linse auf eine ebene Glastafel, bringt man dann auf der einen Seite einen Wassertropfen zwischen die beiden Gläser, so wird dieser bald durch die Capillarität bis zu dem Berührungspunkte der beiden Gläser fortgetrieben, und man hat so auf der einen Seite zwischen den beiden Gläsern eine Wasser- und auf der anderen eine Luftschicht. Auf der Wasserseite sind aber nun die Ringe weit enger, und zwar stehen die Durchmesser der Ringe für die Wasserschicht zu den Durchmessern der entsprechenden Ringe in der Luftschichte im Verhältniß von 3 zu 4; $\frac{3}{4}$ ist aber bekanntlich das Verhältniß der Brechungsexponenten von Wasser und Luft.

§. 251. **Fortsetzung.** Da die entwickelten Gesetze der Farben dünner Schichten mit den Gesetzen der Beugungserscheinungen viele Aehnlichkeit haben, so drängt sich die Idee auf, daß die Farben dünner Blättchen gleichfalls ein Interferenzphänomen sei, wie dies auch Young und Fresnel vollständig bewiesen haben.

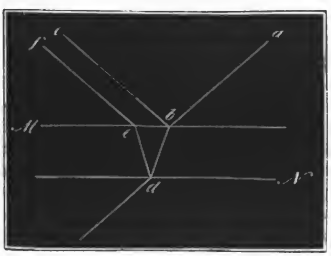


Fig. 70.

Es sei MN (Fig. 70) eine dünne Schicht irgend eines durchsichtigen Körpers, welche durch ein Bündel paralleler Strahlen ab getroffen wird. Dieses Strahlenbündel wird nun theilweise in der Richtung bc reflectirt, theilweise aber nach d gebrochen. Die gebrochenen Strahlen erleiden an der unteren Fläche eine zweite Theilung. Der reflectirte Antheil tritt bei e in derselben Richtung aus, wie der schon an der oberen Fläche reflectirte Strahlenbündel, und deßwegen werden die beiden Strahlenbündel bc und ef interferiren müssen. Wenn der Weg von b nach d $=\frac{1}{2}$ Wellenlänge ist, so ist auch de $=\frac{1}{2}$ Wellenlänge. Die Strahlen des auf der Vorderfläche reflectirten Bündels sind also in ihrem Gange von den Strahlen des auf der Hinterfläche reflectirten Bündels um

Digitized by Google

eine ganze Wellenlänge verſchieden, die beiden Bündel müſſen ſich alſo gegenſeitig unterſtützen. Dasſelbe müßte der Fall ſein, wenn der Weg bde gleich 2, 3, 4 u. ſ. w. Wellenlängen iſt. Wäre dagegen der Weg bde = ½ Wellenlänge oder gleich einem ungeraden Vielfachen einer halben Wellenlänge, ſo müßten die beiden Strahlenbündel ſich gegenſeitig vernichten. Dieſe Folgerungen ſtimmen aber mit der Erfahrung nicht überein. Es iſt gerade umgekehrt; überall, wo nach dem Geſagten es dunkel ſein ſollte, iſt es hell und umgekehrt. Auch wo die beiden Gläſer ſich berühren, müßte es, weil der Weg bde = o iſt, hell ſein, und doch iſt in der Mitte ein dunkler Fleck. Um dieſen Widerſpruch zu heben, müßte man annehmen, daß das von der Hinterfläche reflectirte Strahlenbündel durch irgend eine Urſache noch um ½ Wellenlänge mehr verzögert würde, als man nach der Dicke der zweimal durchlaufenen Schicht erwarten ſollte. Nun zeigt und beweiſt die Undulationstheorie, daß bei der Reflexion nach dem Inneren eines dichteren Körpers zurück eine Welle von entgegengeſetzter Art hervorgebracht wird, als diejenige iſt, welche bei der Reflexion von einem dichteren Körper in einen weniger dichten zurück entſtehen würde *). Wenden wir dies nun auf die dünne zwiſchen zwei Glasflächen eingeſchloſſene Luftſchicht an, ſo iſt klar, daß zwiſchen den an der oberen und an der unteren Grenzfläche reflectirten Strahlenbündeln außer der Differenz der durchlaufenen Wege auch noch der Unterſchied ſtattfindet, daß das eine Lichtbündel in Glas, alſo in einem dichteren Mittel, das andere aber in Luft, alſo in einem weniger dichten Mittel, an der unteren Glasfläche reflectirt wird. Das an der unteren Glasfläche reflectirte Strahlenbündel wird ſich alſo in einem Schwingungszuſtande befinden, welcher dem gerade entgegengeſetzt iſt, welchen man nach der Länge des durchlaufenen Weges erwarten ſollte. Die Oscillationen dieſes zweiten Strahlenbündels gehen alſo gerade ſo vor ſich, als ob ſie einen um ½ Wellenlänge größeren Weg durchlaufen hätten.

Für die Erklärung der Erſcheinung bei weißem Lichte vergl. §. 240.

§. 252. **Farben dünner Blättchen im durchgelaſſenen Lichte und Erklärung derſelben.** Auch in dem durchgelaſſenen Lichte zeigen die dünnen Blättchen Farben, welche jedoch viel blaſſer ſind, als die Farben, welche man in dem reflectirten Lichte beobachtet. Außerdem ſind auch die Farben des durchgelaſſenen Lichtes ſtets complementär zu denen, welche man an denſelben Stellen im reflectirten Lichte beobachtet. In der Mitte des ganzen Ringſyſtems ſieht man bei durchgelaſſenem Lichte einen hellen Fleck, und wenn man homogenes Licht anwendet, ſo findet man, daß die dunkeln Ringe jetzt grade dahin fallen, wo bei reflectirtem Lichte die hellen Ringe waren, und umgekehrt.

*) Um ſich wenigſtens zu verſinnlichen, wie die Aetherſchwingungen hier erfolgen, verglich Young das Glas mit einer größeren Elfenbeinkugel, die Luft mit einer kleineren und die Vibrationen der Elfenbeinmolecüle mit denen des Aethers. Sowie, wenn die größere Kugel an die kleinere anſchlägt, beide ſich in derſelben Richtung fortbewegen, wenn aber umgekehrt die kleinere an die größere anſtößt, die erſtere zurückprallt, und beide nach entgegengeſetzten Richtungen aus einander gehen, ſo erfolge auch eine Umkehrung der Aetherſchwingungen, je nachdem der eine Strahl bei ſeinem Uebergange aus dem Glas in die Luft, oder aus der Luft in das Glas zurückgeworfen wird.

Digitized by Google

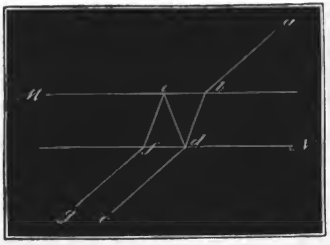


Fig. 71.

Es sei wieder MN (Fig. 71) eine dünne Schicht irgend eines durchsichtigen Körpers, welche durch ein Bündel paralleler Strahlen ab getroffen wird. Die Farbenringe bei durchgelassenem Lichte werden nun durch die Interferenz zweier Lichtbündel erzeugt, von welchen das eine dc direct durch die dünne Schicht hindurchgeht, während das andere fg eine zweimalige innere Reflexion bei d und bei e erlitten hat. Da nun nach §. 251 durch jede der beiden Reflexionen der Weg des Strahlenbündels fg gleichsam um ½ Wellenlänge vergrößert wird, so sind also die beiden Strahlenbündel außer der Differenz der Wege de + ef noch um eine ganze Wellenlänge verschieden. Die Differenz der Wege ist aber an den entsprechenden Stellen dieselbe, wie bei dem reflectirten Lichte. Während zu dieser Differenz bei dem reflectirten Lichte ½ Wellenlänge zugerechnet werden muß, muß beim durchgelassenen also eine ganze Wellenlänge zugerechnet werden. Ueberall also, wo beim reflectirten Lichte die Strahlenbündel sich verstärken, müssen sie sich beim durchgelassenen Lichte aufheben, und umgekehrt. Es erklärt sich hieraus die Erscheinung bei homogenem Lichte und der helle Fleck in der Mitte. Da ferner die Minima aller Farben bei dem durchgelassenen Lichte grade an die Stelle der Maxima für reflectirtes Licht fallen, so ist klar, daß in der Färbung der dünnen Schicht bei durchgelassenem Lichte grade diejenigen Farben fehlen müssen, welche an derselben Stelle bei reflectirtem Lichte vorherrschen, und hieraus ergibt sich die complementäre Färbung der Ringe. Daß endlich die Farben im durchgelassenen Lichte so blaß sind, rührt daher, daß die beiden interferirenden Lichtbündel nicht gleiche Intensität haben. Das eine direct durchgegangene Lichtbündel ist nämlich bedeutend intensiver, als das andere, welches zwei Reflexionen erlitten hat. Wenn also die beiden Strahlenbündel für irgend eine Stelle sich auch in entgegengesetzten Schwingungszuständen befinden, so können sie sich doch wegen ihrer verschiedenen Oscillationsamplitüde nicht vollkommen aufheben, sondern nur gegenseitig schwächen. Es tragen demnach an jeder Stelle alle Farben, die eine mehr, die andere weniger, zur Färbung bei, weßwegen keine sehr entschieden hervortreten kann.

Siebentes Kapitel.

Polarisation des Lichtes.

§. 253. Was ist ein polarisirter Strahl? Ein gewöhnlicher Lichtstrahl besitzt nach allen Seiten hin dieselben Eigenschaften. Fängt man z. B. einen gewöhnlichen Lichtstrahl durch einen Spiegel auf, so wird er stets reflectirt, welches auch die Lage des Spiegels gegen den Strahl sein mag. Dies ist jedoch nicht bei allen Strahlen der Fall. Es gibt auch Lichtstrahlen, welche nicht nach allen Seiten hin dieselben Beziehungen zeigen. Man nennt sie polarisirte Strahlen, und die Eigenthümlichkeit gewisser Licht-

Digitized by Google

strahlen, nicht nach allen Seiten hin dieselben Beziehungen zu zeigen, heißt Polarisation. Die Polarisation des Lichtes wurde 1811 von Malus entdeckt.

§. 254. **Polarisation durch Reflexion.** Fällt ein gewöhnlicher Lichtstrahl auf eine ebene, auf der Rückseite geschwärzte Glastafel unter einem Winkel von 35° 25′, so wird er zum großen Theil nach den gewöhnlichen Gesetzen reflectirt. Der reflectirte Strahl ist aber durch diese Reflexion polarisirt. Zum Beweise dafür lasse man den reflectirten Strahl auf eine zweite, ebenfalls auf der Rückseite geschwärzte Glastafel unter demselben Winkel von 35° 25′ auffallen, und man wird finden, daß er jetzt nicht in allen Lagen des oberen Spiegels von demselben zurückgeworfen wird. Die beiden Spiegelebenen seien zuerst parallel, so daß die Reflexionsebene beider zusammenfällt. Der Strahl wird, wie jeder gewöhnliche Lichtstrahl, reflectirt. Dreht man nun den zweiten Spiegel, ohne daß die Neigung desselben zu dem Strahle sich ändert, so wird die Intensität des zum zweiten Male reflectirten Strahles um so mehr abnehmen, je mehr der Winkel wächst, welchen die Reflexionsebene des zweiten Spiegels mit derjenigen des ersten Spiegels macht, bis dieser Winkel 90° geworden ist, oder, mit anderen Worten, bis die Reflexionsebenen beider Spiegel sich unter einem rechten Winkel kreuzen. Bei dieser Stellung wird der Strahl von dem zweiten Spiegel gar nicht mehr reflectirt. Bei weiter fortgesetzter Drehung des zweiten Spiegels nimmt die Intensität des reflectirten Strahles allmählig wieder zu, bis sie ein zweites Maximum erreicht, wenn die ganze Drehung 180° beträgt. In dieser Stellung fallen die Reflexionsebenen der beiden Spiegel abermals zusammen. Dreht man noch weiter, so wird der von dem zweiten Spiegel reflectirte Strahl wieder schwächer, und verschwindet zum zweiten Male ganz, wenn die Reflexionsebenen wieder gekreuzt sind, also bei einer Drehung von 270° u. s. w. Polarisationsapparat (Polarisationsspiegel und Zerlegungsspiegel). Während fast alle spiegelnden Oberflächen als Polarisationsspiegel dienen können, kann kein Lichtstrahl durch Reflexion von einem Metall polarisirt werden.

§. 255. **Polarisationswinkel.** Gibt man dem unteren Spiegel eine andere, als die angegebene Stellung gegen die einfallenden Strahlen, so findet man, daß das von dem oberen Spiegel zurückgeworfene Licht nie ganz Null wird, wenn schon der obere Spiegel auch jetzt, sobald die beiden Reflexionsebenen gekreuzt sind, weniger Licht reflectirt, als in jeder anderen Stellung. Es läßt sich daraus schließen, daß die unter jedem anderen Winkel außer dem Winkel von 35° 25′ vom unteren Spiegel reflectirten Strahlen zwar zum Theil, aber doch nicht vollständig polarisirt sind. Je mehr der Winkel, welchen die auf den Spiegel fallenden Strahlen mit der Ebene dieses Spiegels machen, von 35° 25′ abweicht, desto unvollständiger ist die Polarisation. Der Winkel, für welchen die vollständige Polarisation stattfindet, wird der Polarisationswinkel genannt. Der Polarisationswinkel ist nicht für alle Substanzen gleich; jeder Körper hat seinen eigenthümlichen Polarisationswinkel. Während er für Glas 35° 25′ ist, ist er für Obsidian 33° u. s. w. Brewster hat durch die Vergleichung der Erfahrungsresultate das merkwürdige Gesetz aufgefunden, daß der Polarisationswinkel derjenige ist, für welchen der reflectirte Strahl auf dem gebrochenen rechtwinklig steht. Da nun aber

Digitized by Google

der Brechungsexponent der verschiedenfarbigen Strahlen nicht gleich ist, so ist klar, daß selbst für eine und dieselbe Substanz der Polarisationswinkel nicht für die Strahlen aller Farben gleich sein kann. Es erklärt sich daraus ganz einfach, warum ein Strahl weißen Lichtes durch Reflexion niemals vollständig polarisirt ist, warum also selbst bei der Kreuzung der Reflexionsebenen noch Spuren von Licht von dem oberen Spiegel reflectirt werden.

§. 256. **Polarisation durch gewöhnliche Brechung.** Wenn Lichtstrahlen unter einem Winkel von 35° 25′ auf eine durchsichtige Glastafel fallen, so werden sie zum Theil reflectirt, und durch diese Reflexion, wie schon bemerkt, polarisirt, zum Theil gehen sie auch durch die Glastafel durch. Die hindurchgegangenen Strahlen zeigen nun ebenfalls Spuren von Polarisation. Läßt man die durchgegangenen Strahlen, deren Polarisation sehr schwach ist, auf eine zweite, der ersteren parallele Glastafel fallen, so sind sie nach ihrem Durchgange durch diese zweite Glasplatte schon vollständiger polarisirt. Durch eine dritte, vierte, fünfte Glasplatte wird die Polarisation immer vollständiger; durch 8 bis 10 erhalten die durchgegangenen Strahlen schon eine ziemlich vollständige Polarisation. Denn wenn man ein solches System von Glasplatten statt des Zerlegungsspiegels als Kopf des Polarisationsapparates gebraucht, so wird beim Durchsehen durch die Glasplatten das Gesichtsfeld dunkel erscheinen, wenn die Reflexionsebene der Platten mit der Reflexionsebene der einfallenden Strahlen zusammenfällt,, hell dagegen, wenn die Reflexionsebene der Glasplatten auf der Reflexionsebene der von Unten kommenden Strahlen rechtwinklig steht.

Von der Polarisation durch doppelte Brechung ist im folgenden Kapitel die Rede.

§. 257. **Polarisation durch Turmalinplatten.** Ein Lichtstrahl, welcher durch eine Turmalinplatte hindurchgegangen ist, wird dadurch polarisirt. Denn wenn man 2 parallel mit der krystallographischen Hauptaxe geschnittene Turmalinplatten so auf einander legt, daß ihre Axen parallel sind, so werden sie einfallendes, gewöhnliches Licht eben so gut durchlassen, wie eine Platte, welche so dick ist, wie beide zusammen. Dreht man aber die eine Platte in ihrer Ebene herum, ohne die Lage der andern zu ändern, so wird das durchgelassene Licht schwächer und schwächer, bis es endlich ganz verschwindet, wenn die Axen beider Platten einen rechten Winkel mit einander machen. Turmalinzange als kleiner Polarisationsapparat. Nimmt man von dem Polarisationsapparat den Zerlegungsspiegel weg, und läßt man statt auf diesen die polarisirten Strahlen auf eine Turmalinplatte fallen, deren Oberflächen der krystallographischen Hauptaxe parallel sind, so gewahrt man folgende Erscheinungen: Hat die Platte eine solche Stellung, daß ihre krystallographische Hauptaxe rechtwinklig auf der Reflexionsebene der einfallenden Strahlen steht, so läßt sie die Strahlen so vollständig durch, als es die Färbung des Minerals erlaubt. Macht aber die Axe der Platte einen anderen Winkel mit dieser Reflexionsebene, so ist das durchgehende Licht um so schwächer, je kleiner dieser Winkel wird. Fällt die Axe der Platte in die Reflexionsebene, so ist die Intensität des durchgegangenen Lichtes ein Minimum, und, falls die Platte dick genug ist, vollständig gleich Null. An den Turmalinplatten, welche zu diesen Versuchen geschliffen im Handel vorkommen, sind gewöhnlich keine natürlichen Krystallflächen mehr sichtbar; man kann deßhalb der Platte durchaus nicht

Digitized by Google

mehr ansehen, in welcher Richtung ihre Are liegt. Die Lage der Are läßt sich aber durch den Versuch am Polarisationsapparate sehr leicht ausmitteln. Stellt man nämlich die Platte so, daß das durchgelassene Licht ein Minimum ist, so wird eine durch den Nullpunkt der Theilung gehende verticale Ebene, welche zugleich rechtwinklig auf der Oberfläche des Krystalls steht, diesen in der Richtung seiner krystallographischen Hauptare durchschneiden.

§. 258. **Polarisation durch unregelmäßige Reflexion.** Das Licht, welches eine hell erleuchtete Fläche nach allen Seiten hin unregelmäßig reflectirt, ist immer theilweise polarisirt. Denn wenn man eine solche Fläche durch eine Turmalinplatte betrachtet, so wird man finden, daß, je nachdem man die Turmalinplatte dreht, die Fläche bald heller, bald dunkler erscheint. Selbst das Licht des heiteren Himmels ist oft stark polarisirt, wie man sich durch den Versuch mit der Turmalinplatte überzeugen kann.

§. 259. **Erklärung der Polarisation durch die Vibrationstheorie.** Ein Lichtstrahl ist polarisirt, wenn alle seine Schwingungen in einer und derselben Ebene stattfinden, während bei einem gewöhnlichen Lichtstrahl die Vibrationen nicht immer in derselben Ebene bleiben, sondern nach allen möglichen, auf der Richtung des Strahls rechtwinkligen Richtungen variiren. Die Ebene, in welcher alle Schwingungen eines polarisirten Strahles stattfinden, heißt die Vibrationsebene desselben. Denkt man sich durch die Richtung des Strahls eine Ebene rechtwinklig auf die Vibrationsebene gelegt, so wird diese die Polarisationsebene des Strahls genannt. Die Erscheinungen der Polarisation nöthigten, von der früheren Ansicht abzugehen, nach welcher man sich den Aether als ein elastisches Fluidum dachte, in welchem sich die an einander liegenden Theilchen unmittelbar berühren, auch nach Verhältniß des angewandten Druckes verdichten lassen, und nach welcher man daher, analog wie bei dem Schalle, die Schwingungen der Aethertheilchen durch Verdichtung und Verdünnung in der Richtung des Strahles erfolgen ließ. Denn nach dieser Ansicht war es nicht zu erklären, wie ein Strahl in Beziehung auf die eine Seite anders modificirt erscheinen könnte, als in Beziehung auf die um einen rechten Winkel von ihr abstehende. Für die Querschwingungen, wie sie jetzt angenommen werden, reicht es hin, beim Aether einen solchen Grad der Adhäsion anzunehmen, wobei jedes Theilchen in den Stand gesetzt wird, nicht bloß die in der Richtung seiner Bewegung liegenden Theilchen vor sich hin zu stoßen, sondern auch die zunächst an der Seite liegenden mit sich fortzuziehen.

Da man die Schwingungen der einzelnen Aethertheilchen nach dem Parallelogramm der Kräfte alle in 2 auf einander senkrechte Schwingungen zerlegen kann, so ist ersichtlich, daß man jeden natürlichen Lichtstrahl als aus 2 rechtwinklig gegen einander polarisirten Strahlen bestehend denken kann. Nimmt man nun an, daß es Körper gebe, welche entweder an ihrer Oberfläche oder in ihrem Innern die Eigenschaft besitzen, einen gewöhnlichen oder unpolarisirten Lichtstrahl in 2 senkrecht zu einander polarisirte Strahlen zu zerlegen, so erklären sich daraus die obigen Erscheinungen. Bekanntlich wird, wenn ein Lichtstrahl auf einen durchsichtigen Körper fällt, ein Theil desselben durchgelassen, ein anderer reflectirt. Wieviel durchgelassen, und wieviel reflectirt wird, hängt von den Winkeln ab, unter welchen die schwingenden Aethertheilchen die Oberfläche des durchsichtigen Körpers treffen.

Digitized by Google

Je größer diese Winkel sind, desto leichter geht das Licht durch, je kleiner sie sind, desto mehr wird das Licht reflectirt. Denkt man sich nun, der Lichtstrahl a b (Fig. 72) werde in dem Punkte b in 2 Lichtstrahlen zerlegt, von welchen der eine nach der Richtung r s, also senkrecht zur Reflexionsebene a b c, oder, was dasselbe ist, parallel mit der Oberfläche des Polarisationsspiegels polarisirt ist, während der andere in einer zu r s und natürlich auch zur Richtung a b des Strahls senkrechten Richtung b x polarisirt ist, so sieht man leicht ein, welcher von beiden Strahlen reflectirt, und welcher gebrochen werden wird. Da nämlich die Schwingungen des letzteren unter einem Winkel von 54° 35′ gegen den Spiegel gerichtet sind, so geht er größtentheils durch, während der erste, dessen Schwingungen parallel zur Oberfläche des Spiegels sind, nach b c fortschreitet. In c sind seine Schwingungen auch zu o p parallel, und werden daher ebenso nach c d reflectirt, wenn o p || m n, oder um einen Winkel von 180° gedreht worden ist. Dreht man dagegen o p um 90° oder um 270°, so fallen die mit r s parallelen Schwingungen unter einem Winkel von 54° 35′ auf o p, und gehen daher jetzt größtentheils durch. In allen übrigen Lagen von o p kann natürlich b c weder bloß reflectirt, noch bloß durchgelassen werden, sondern beides mehr oder weniger, je nachdem man sich einer der vier erwähnten Hauptlagen mehr oder weniger nähert.

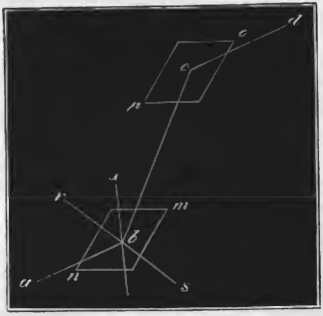


Fig. 72.

Da nach §. 257, wenn man o p durch eine Turmalinplatte ersetzt, diese b c durchläßt, wenn ihre krystallographische Hauptare rechtwinklig auf der Reflexionsebene a b c steht, oder, was dasselbe ist, wenn diese Are parallel den Schwingungen der Aethertheilchen des Strahls b c ist, so muß man annehmen, daß Turmalinplatten nur solche Schwingungen der Aethertheilchen durch sich hindurchlassen, welche parallel ihrer krystallographischen Hauptare erfolgen. Durch diese Annahme erklären sich dann ganz leicht die in §. 257 beschriebenen Versuche mit der Turmalinzange. Man sieht ein, warum das Licht auch durch die zweite Platte hindurchgeht, wenn beide Aren parallel sind. Hat aber die Are der zweiten Platte irgend eine andere Stellung, so muß man die die zweite Platte treffenden Schwingungen nach dem Parallelogramm der Kräfte zerlegen in Schwingungen parallel der Are der zweiten Platte, und in Schwingungen senkrecht zu dieser Are, die letzteren gehen natürlich für die Wirkung verloren, und deßwegen ist, bei der Kreuzung der beiden Aren, da dann die ersteren gleich Null werden, das Gesichtsfeld dunkel.

§. 260. **Turmalinplatte zwischen den gekreuzten Spiegeln.** Nach dem vorhergehenden Paragraphen lassen sich nun auch die Erscheinungen erklären, welche beobachtet werden, wenn man eine Turmalinplatte zwischen die gekreuzten Spiegel eines Polarisationsapparates bringt. Fällt nämlich

Digitized by Google

die Schwingungsebene des Turmalins mit derjenigen des unteren oder des oberen Spiegels zusammen, so erscheint sie dunkel; in jeder anderen Lage hell, und zwar am hellsten, wenn die Schwingungsebene der Turmalinplatte den rechten Winkel halbirt, welchen die Schwingungsebene des unteren Spiegels mit derjenigen des oberen macht.

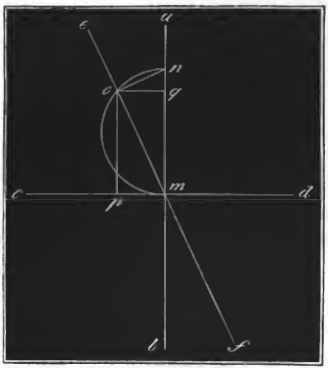


Fig. 73.

Es sei nämlich a b (Fig. 73) die Schwingungsebene des unteren Spiegels, c d diejenige des oberen, e f diejenige der Turmalinplatte, m n sei die Vibrationsintensität des von dem unteren Spiegel polarisirten Strahles. Diese Vibration wird durch die Turmalinplatte zerlegt. Die Vibrationsintensität m o in der Ebene e f findet man, indem man von n ein Perpendikel n o auf e f fällt. Allein der durch die Turmalinplatte gegangene in der Ebene e f mit der Intensität m o schwingende Strahl wird durch den oberen Spiegel nochmals nach der Ebene c d zerlegt, und die bekannte Construction gibt m p als Vibrationsintensität nach dieser zweiten Zerlegung. Es ist nun klar, daß sich die Größe von m p ändert, wenn die Ebene e f ihre Lage ändert. Weil $\sphericalangle$ m o n $=$ 1 R. ist, so muß der Punkt o, welches auch die Lage der Ebene e f sein mag, stets auf dem Umfange eines Halbkreises liegen, dessen Durchmesser m n ist. Nun aber ist **m p $=$ o q.** Wenn o mit n zusammenfällt, so ist **o q $=$ m p $=$ o, d. h.** das Gesichtsfeld ist dunkel, wenn die Schwingungsebene des Turmalins mit derjenigen des unteren Spiegels zusammenfällt. Ebenso ist es, wenn o mit m zusammenfällt, d. h. das Gesichtsfeld ist ebenfalls dunkel, wenn die Schwingungsebene des Turmalins mit derjenigen des oberen Spiegels zusammenfällt. Je mehr o auf der Peripherie des Kreises von n aus fortrückt, desto größer wird das Perpendikel o q, und es erreicht sein Maximum, wenn o um einen Quadranten von n absteht, denn in diesem Falle ist das Perpendikel dem Radius des Kreises gleich. Wenn aber o um einen Quadranten von n absteht, so macht die Schwingungsebene e f einen Winkel von 45° mit den Schwingungsebenen der beiden Spiegel (die Turmalinplatte erscheint am hellsten).

Achtes Kapitel.

Doppelte Brechung des Lichtes.

§. 261. **Erscheinungen, welche bei Kalkspathkrystallen beobachtet werden.** Viele Körper haben die merkwürdige Eigenschaft, jeden einfallenden Lichtstrahl in zwei gebrochene Strahlen zu spalten; man nennt sie **doppeltbrechende Körper.** Die doppelte Brechung wurde zuerst von **Eras-**

Digitized by Google

mus Bartholinus am isländischen Kalkspath entdeckt, und 1669 beschrieben. Wenn man einen Kalkspathkrystall dicht vor das Auge hält, um durch denselben einen dünnen Körper, etwa eine Stecknadel, zu sehen, so erblickt man zwei deutlich getrennte Bilder des Körpers. Legt man den Krystall auf ein Blatt weißes Papier, auf welches man einen schwarzen Punkt gemacht hat, so sieht man den Punkt doppelt.

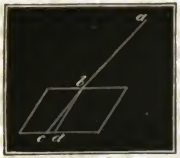


Fig. 74.

Legt man auf die eine Fläche des Krystalls ein Kartenblatt, in welches mit einer Stecknadel ein kleines Loch gestochen worden ist, und läßt man durch diese Oeffnung einen Lichtstrahl a b (Fig. 74) auf den Krystall fallen, so wird man auf einem etwas durchsichtigen Papierblatte, mit welchem man die der Eintrittsfläche gegenüberliegende Fläche bedeckt, zwei helle Punkte bei c und bei d erblicken. Es sind also von der Oeffnung b aus zwei ganz getrennte Strahlen durch den Krystall hindurchgegangen, und der Lichtstrahl a b wird bei seinem Eintritt in den Kalkspathkrystall in zwei Strahlen gespalten, welche, verschiedenen Brechungsgesetzen folgend, den Krystall in verschiedener Richtung durchlaufen. Der eine Strahl ist stärker von seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt, als der andere. Da man nach §. 232 nach der Vibrationstheorie annehmen muß, daß sich die Lichtstrahlen in einem stärker brechenden Mittel langsamer fortpflanzen, so hängt also die ungleiche Ablenkung der Strahlen b c und b d auch mit einer ungleichen Fortpflanzungsgeschwindigkeit zusammen; der stärker gebrochene Strahl b d pflanzt sich mit geringerer Geschwindigkeit durch den Krystall fort, als der andere. Dieser Versuch lehrt uns also zwei verschiedene Strahlenarten kennen, welche den Kalkspath mit ungleicher Geschwindigkeit durchlaufen. Daß aber auch in einer und derselben Richtung zwei verschiedene Strahlen sich mit ungleicher Geschwindigkeit durch den Krystall fortpflanzen können, geht aus folgendem Versuch hervor.

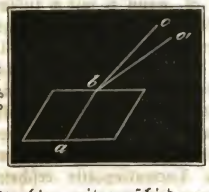


Fig. 75.

Man lege einen Kalkspathkrystall auf ein Blatt weißes Papier, auf welches man einen schwarzen Punkt gemacht hat. Wenn man nun auf die obere Fläche des Krystalls ein Stückchen Papier mit einer kleinen Oeffnung b (Fig. 75) legt, so sieht man in der Oeffnung b das Bild des schwarzen Punktes a nur nach zwei ganz bestimmten Richtungen b o und b o'. Daraus geht aber hervor, daß in der Richtung a b zwei Strahlen mit verschiedener Geschwindigkeit den Krystall durchlaufen, denn wenn sich von a nach b nur ein einziger Strahl mit unveränderlicher Geschwindigkeit fortpflanzte, so könnte er nur nach einer einzigen bestimmten Richtung austreten.

§. 262. **Krystallform des Kalkspaths.** Die zahlreichen Formen, unter welchen der Kalkspath (krystallisirter kohlensaurer Kalk) vorkommt, gehören alle dem heragonalen (3- und 1axigen) Krystallsysteme an, und lassen sich sämmtlich von einer und derselben Grundform ableiten. Die Kalkspathkrystalle sind nach 3 verschiedenen Richtungen spaltbar, und dadurch ist es möglich, aus denselben Rhomboëder durch Spaltung zu erhalten. Beson-

Digitized by Google

ders schöne, große und durchsichtige Kalkspathkrystalle werden auf der Insel Island gefunden, der isländische Doppelspath wird deßhalb auch vorzugsweise zu Versuchen über die doppelte Brechung angewandt. Die Grundgestalt des heragonalen Krystallsystems ist die sechsseitige Doppelpyramide. Die sechs horizontalen Kanten derselben bilden ein regelmäßiges Sechseck, die graden Linien, welche die gegenüberstehenden Ecken dieses Sechsecks mit einander verbinden, sind die 3 Nebenaren. Sie sind einander gleich, und schneiden sich unter einem Winkel von 60°. Ein auf die Ebene der 3 horizontalen Nebenaren in ihrem Durchschnittspunkte errichtetes Perpendikel verbindet die Spitzen der Doppelpyramide, und ist die Hauptare des Krystalls. Werden die horizontalen Kanten durch Flächen parallel der Hauptare abgestumpft, so entsteht eine regelmäßige sechsseitige Säule, oben und unten durch eine sechsseitige Pyramide begrenzt. Werden diese Pyramiden immer flacher und flacher, so daß endlich ihre Spitzen in ihre Grundflächen fallen, so entsteht eine sechsseitige Säule, oben und unten durch eine Ebene begrenzt, welche auf der Hauptare rechtwinklig steht (diese Form wird am Kalkspath häufig beobachtet). Das Rhomboëder ist die *hemiëdrische* Gestalt der sechsseitigen Doppelpyramide, d. h. man kann sich aus dieser das Rhomboëder dadurch abgeleitet denken, daß die Hälfte der Flächen bis zu dem Verschwinden der übrigen wächst. An den Kalkspathrhomboëdern unterscheidet man 2 *stumpfe Ecken*, sie heißen so, weil sie durch je 3 stumpfe ebene Winkel von 105° 5′ gebildet werden, während die 6 übrigen Ecken durch je 2 spitze Winkel von 74° 55′ und einen stumpfen Winkel von 105° 5′ gebildet werden. Die beiden stumpfen Ecken liegen einander gegenüber. Die Hauptare des Krystalls geht durch die Mitte der stumpfen Ecken, d. h. sie macht gleiche Winkel mit jeder der 3 stumpfen Kanten. Wir haben bisher nur solche Rhomboëder betrachtet, an welchen alle Flächen gleichmäßig ausgebildet sind, was meistens nicht der Fall ist. In der Regel findet man den Kalkspath nur als rhomboëdrische Stücke, deren einzelne Flächen nicht mehr gleich sind. Dadurch ist aber die gegenseitige Lage der Flächen und die Größe der Winkel nicht im Mindesten geändert. Man unterscheidet vor wie nach spitze und stumpfe Ecken, und die Richtung der Hauptare ist immer derjenigen Linie parallel, welche gleiche Winkel mit jeder der 3 in einer stumpfen Ecke zusammenlaufenden Kanten macht.

§. 263. **Beobachtungen durch Kalkspathprismen.** Wenn man ein Prisma aus Kalkspath verfertigt, so sieht man durch dasselbe in der Regel 2 Bilder desselben Gegenstandes, und zwar ist der Abstand der beiden Bilder nicht allein von dem brechenden Winkel des Prismas, sondern auch von der Richtung abhängig, in welcher die Strahlen den Krystall durchlaufen. Wenn von einem Prisma der brechende Winkel und das Minimum der Ablenkung bekannt sind, so läßt sich daraus der Brechungsexponent des Stoffes, aus welchem das Prisma gemacht ist, berechnen. Hat man nun ein Kalkspathprisma, dessen brechende Kante der Are parallel ist, so findet man als Brechungsexponent für das am wenigsten abgelenkte Bild 1,483, während derselbe für das andere Bild = 1,654 ist. In unserem Falle bewegen sich die beiden Strahlen, sowohl der, welcher das am meisten abgelenkte Bild gibt, als auch der andere in solchen Richtungen durch den Krystall, welche auf der Hauptare desselben rechtwinklig stehen. Nimmt

Digitized by Google

man ein Kalkſpathprisma, deſſen brechende Ebenen irgend eine andere Lage gegen die Hauptare haben, ſo werden die Strahlen das Prisma nicht mehr in ſolchen Richtungen durchlaufen, welche rechtwinklig zur Hauptare ſind. Beſtimmt man jetzt abermals die Brechungsexponenten der beiden Strahlen, ſo findet man für das am meiſten abgelenkte Bild wieder den Brechungsexponenten 1,654, für den Brechungsexponenten des anderen Strahles aber einen anderen zwiſchen den Grenzen 1,654 und 1,483 liegenden Werth, welcher mit der Richtung variirt, in welcher der Strahl den Kryſtall durchläuft.

§. 264. **Ordinärer und extraordinärer Strahl; optiſche Axe.** Der eine Strahl, deſſen Brechungsexponent beſtändig = 1,654 gefunden wird, folgt alſo ganz dem Geſetze der gewöhnlichen Brechung, er wird deßhalb der ordinäre Strahl genannt. Der andere Strahl aber, für welchen kein unveränderliches Verhältniß zwiſchen dem Sinus des Einfallswinkels und dem Sinus des Brechungswinkels beſteht, heißt der extraordinäre Strahl. Da beim Kalkſpath die ordinären Strahlen ſtets die am meiſten abgelenkten ſind, ſo pflanzen ſie ſich auch mit geringerer Geſchwindigkeit im Kryſtall fort, als die extraordinären. Aus der Unveränderlichkeit des Brechungsexponenten, welchen man für den ordinären Strahl aus allen Verſuchen erhält, ergibt ſich, daß die ordinären Strahlen nach allen Richtungen hin den Kryſtall mit gleicher Geſchwindigkeit durchlaufen. Da man für die extraordinären Strahlen nicht immer denſelben Brechungsexponenten findet, ſo iſt klar, daß ſie ſich nicht nach allen Richtungen hin mit gleicher Geſchwindigkeit im Kryſtalle fortpflanzen. Der kleinſte Werth, welchen man für den Brechungsexponenten der extraordinären Strahlen findet, iſt 1,483, und dieſen Werth findet man, wenn die extraordinären Strahlen in irgend einer Richtung den Kryſtall durchlaufen, welche rechtwinklig auf der Hauptare des Kryſtalls ſteht. In dieſer Richtung pflanzen ſich alſo die extraordinären Strahlen im Kryſtall am ſchnellſten fort. Die Geſchwindigkeit der extraordinären Strahlen iſt um ſo geringer, je mehr ſich die Richtung, in welcher ſie den Kryſtall durchlaufen, der kryſtallographiſchen Hauptare nähert. In der Richtung dieſer Are ſelbſt aber pflanzen ſich alle Strahlen mit einer ſolchen Geſchwindigkeit, wie ſie dem Brechungsexponenten 1,654 entſpricht, alſo mit der Geſchwindigkeit der ordinären Strahlen fort.

Da alſo in der Richtung der kryſtallographiſchen Hauptare gleichſam gar keine doppelte Brechung ſtattfindet, ſo iſt dieſe Are optiſch von jeder anderen Richtung im Kryſtalle verſchieden, und deßhalb wird ſie auch die optiſche Are genannt. Daß in der Richtung der optiſchen Are wirklich keine doppelte Brechung ſtattfindet, läßt ſich am einfachſten mit Hilfe eines Prismas zeigen, deſſen brechende Flächen ungefähr gleich ſtark gegen die Richtung der optiſchen Are geneigt ſind. Je nachdem man ein ſolches Prisma vor das Auge hält, ſieht man ein einziges oder zwei Bilder deſſelben Gegenſtandes; wenn man zwei Bilder ſieht, ſo kann man das Prisma ſo drehen, daß ſich die beiden Bilder mehr und mehr einander nähern, und daß ſie endlich ganz zuſammenfallen. In dieſem Falle durchlaufen die gebrochenen Strahlen das Prisma in der Richtung der optiſchen Are.

§. 265. **Wellenoberflächen der ordinären und extraordinären Strahlen.** Unter der Wellenoberfläche verſteht man diejenige Fläche, in welcher die von einem Lichtpunkte ausgehenden Bewegungen gleichzeitig anlangen.

Digitized by Google

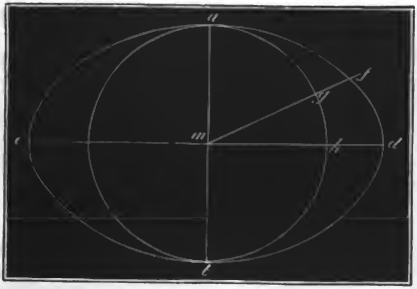


Fig. 76.

ab (Fig. 76) sei die Richtung der optischen Are in einem Kalkspath, mh sei die Geschwindigkeit der ordinären, md die Geschwindigkeit der extraordinären Strahlen, mit welcher sie sich rechtwinklig zur optischen Are im Krystall fortpflanzen. Eine Ellipse, deren kleine Are ab, deren große Are cd ist, und bei welcher ab : cd = 1,483 : 1,654, stellt das Gesetz dar, nach welchem sich die Geschwindigkeit der extraordinären Strahlen im Kalkspath mit ihrer Richtung ändert. Wollte man z. B. die Geschwindigkeit eines extraordinären Strahles ermitteln, dessen Richtung mit der optischen Are einen Winkel von 60° macht, so hat man nur durch den Mittelpunkt m eine Linie mf so zu ziehen, daß ∢ amf = 60° ist, so stellt mf die Geschwindigkeit des extraordinären Strahls in der angegebenen Richtung dar. Denken wir uns nun die Figur um die Are ab gedreht, so entsteht durch die Umdrehung des Kreises eine Kugel, und durch die Umdrehung der Ellipse ein Ellipsoïd. Die Kugel stellt uns dann die Wellenoberfläche der ordinären Strahlen, das Ellipsoïd die Wellenoberfläche der extraordinären Strahlen dar. Beim Kalkspath ist die Kugel ganz von dem Ellipsoïd eingehüllt, weil sich die ordinären Strahlen langsamer fortpflanzen, als die extraordinären. Nur in 2 Punkten berührt die Kugel das Ellipsoïd, denn die kleine Are des Ellipsoïds ist ja zugleich ein Durchmesser der Kugel.

§. 266. **Der extraordinäre Strahl bleibt nicht immer in der Einfallsebene.** Die Eigenthümlichkeit der extraordinären Strahlen, daß sie den Krystall in verschiedenen Richtungen mit verschiedener Geschwindigkeit durchlaufen, ist nicht die einzige, welche sie von gewöhnlich gebrochenen Strahlen unterscheidet, sondern ein extraordinärer Strahl bleibt auch nicht immer in der Einfallsebene, wie der gewöhnlich gebrochene Strahl.

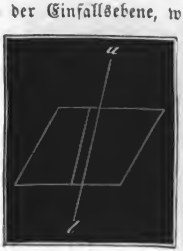


Fig. 77

Zieht man nämlich auf ein Blatt weißes Papier eine grade Linie ab (Fig. 77), und bringt das Auge in irgend einen Punkt der durch die Linie gelegten Verticalebene, und legt man nun ein Kalkspathrhomboëder so auf das Papier, daß dadurch ein Theil der Linie bedeckt wird, so sieht man im Krystall ein doppeltes Bild der Linie. Das eine Bild fällt in die Richtung ab, die Strahlen, welche es erzeugen, bleiben also in der Einfallsebene; das andere Bild hingegen liegt rechts oder links von ab, die Strahlen, welche dieses Bild erzeugen, sind also **nicht in der durch die Linie ab und das Auge gelegten Einfallsebene geblieben. Nur in einem besonderen Falle fällt auch das extraordinäre Bild in die Einfallsebene, wenn nämlich die optische Are des Krystalls selbst**

Digitized by Google

in der Einfallsebene liegt. In diesem Falle decken sich auch die beiden Bilder der Linie.

§. 267. **Zusammenhang der Krystallform mit der doppelten Brechung.** Alle Krystalle, welche zu dem regulären Krystallsystem gehören, haben keine doppelte Brechung, alle Krystalle aber, welche zu irgend einem anderen Krystallsysteme gehören, sind doppeltbrechend. Man theilt dann die doppeltbrechenden Krystalle ein in einarige und zweiarige. Einarig heißen solche Krystalle, welche nur eine optische Are haben, d. h. in denen es nur eine Richtung gibt, nach welcher der Krystall von allen Lichtwellen mit gleicher Geschwindigkeit durchlaufen wird; zweiarig sind diejenigen Krystalle, welche 2 optische Aren haben, oder in welchen es 2 Richtungen gibt, in welchen sich alle ebenen Lichtwellen mit derselben Geschwindigkeit fortpflanzen. Alle Krystalle des quadratischen und des heragonalen Systems (zwei- und einarig, drei- und einarig) sind optisch einarig, alle Krystalle der 3 folgenden Systeme, des rhombischen, des monoklinischen und des triklinischen Systems (ein- und einarig, zwei- und eingliedrig, ein- und eingliedrig) haben 2 optische Aren.

§. 268. **Positive und negative einarige Krystalle.** Die optisch einarigen Krystalle werden eingetheilt in positive und negative. Positiv heißt ein optisch einariger Krystall, bei welchem der extraordinäre Strahl stärker gebrochen wird, als der ordinäre, wie der Quarz (Bergkrystall); negativ heißen diejenigen, bei welchen die ordinären Strahlen stärker gebrochen werden, als die extraordinären, wie der Kalkspath, der Turmalin. Bei allen einarigen Krystallen, den positiven sowohl, wie den negativen, fällt die optische Are mit der krystallographischen Hauptare zusammen. Bei den positiven Krystallen ist, wie bei den negativen, die Wellenoberfläche der ordinären Strahlen eine Kugel, und diejenige der extraordinären Strahlen ein Ellipsoid, aber bei den positiven Krystallen wird das Ellipsoid von der Kugel ganz eingehüllt, auch ist das Ellipsoid ein Umdrehungsellipsoid um seine große Are (vergl. §. 265).

§. 269. **Polarisation durch doppelte Brechung.** Wenn man die Lichtstrahlen genauer untersucht, welche durch irgend einen doppeltbrechenden Körper hindurchgegangen sind, so findet man, daß sie stets polarisirt sind. Am leichtesten kann man sich hiervon auf folgende Weise überzeugen: Man halte irgend ein doppeltbrechendes Prisma vor das Auge, so wird man von einem und demselben Gegenstande zwei Bilder sehen. Hält man nun zwischen das Auge und das Prisma eine polarisirende Turmalinplatte, so wird man leicht eine bestimmte Stellung derselben ausmitteln können, bei welcher nur eines der beiden Bilder sichtbar ist; dreht man alsdann die Turmalinplatte in ihrer Ebene langsam um, so wird alsbald das zweite Bild auch sichtbar werden. Je weiter man dreht, desto lichtschwächer wird das erste Bild, während das zweite stärker wird, und wenn man endlich um 90° gedreht hat, so verschwindet das erste Bild, und nur das zweite ist sichtbar. Daraus geht nun nicht allein hervor, daß die Lichtstrahlen der beiden Bilder polarisirt sind, sondern auch, daß die Polarisationsebene des einen Bildes rechtwinklig auf der Polarisationsebene des anderen steht, oder, mit anderen Worten, daß die beiden Strahlenarten, welche sich durch einen doppeltbrechenden Krystall fortpflanzen, rechtwinklig zu einander polarisirt sind. Hat man ein Kalkspathprisma, dessen brechende Kante parallel

Digitized by Google

der optischen Are ist, so liegen die beiden Bilder neben einander, wenn man die Kante des Prismas vertical hält. Bringt man nun die Turmalinplatte zwischen das Prisma und das Auge, so verschwindet das eine Bild, wenn die krystallographische Hauptare der Turmalinplatte vertical, also parallel der Kante des Prismas gehalten wird; das andere Bild verschwindet, wenn die Are der Turmalinplatte wagrecht steht. Da nun nach §. 259 die Turmalinplatte nur solche polarisirte Strahlen durchläßt, deren Schwingungen parallel ihrer Hauptare sind, so geht aus dem obigen Versuche hervor, daß die Vibrationen, welche das eine Bild erzeugen, parallel der optischen Are des Kalkspathprismas sind, während die Aethervibrationen, welche den anderen Strahl fortpflanzen, in einer Ebene vor sich gehen, welche auf der optischen Are rechtwinklig steht. Um für alle Prismen, nicht nur für solche, deren Kante parallel der optischen Are ist, die Richtung, nach welcher die Vibrationen für die beiden Strahlen stattfinden, bestimmen zu können, denke man sich durch die Richtung, in welcher ein Lichtstrahl den Krystall durchläuft, und durch die Richtung der optischen Are eine Ebene gelegt, so sind die Schwingungen des ordinären Strahls stets rechtwinklig auf dieser Ebene, also auch rechtwinklig auf der Richtung der optischen Are, und die Schwingungen des extraordinären Strahls finden in der Ebene selbst statt. Eine solche Ebene, gelegt durch die Richtung eines Strahls und die optische Are, heißt ein Hauptschnitt.

§. 270. **Erklärung der doppelten Brechung durch die Vibrationstheorie.** Da die verschiedene Brechung nach dieser Theorie abhängt von der verschiedenen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Lichtstrahlen, und diese bedingt wird durch die Elasticität des Aethers in der Richtung, nach welcher die Vibrationen stattfinden, so nimmt man an, daß in allen doppeltbrechenden Krystallen die Elasticität des Aethers nicht nach allen Richtungen gleich sei. Diese Annahme ist um so wahrscheinlicher, da die Krystalle außer denen des regulären Systems auch in vielen anderen Beziehungen nach verschiedenen Richtungen eine Verschiedenheit zeigen, z. B. in der Wärmeleitungsfähigkeit, Cohäsion der Theilchen, Spaltbarkeit u. s. w. Da in einem positiven Krystalle die ordinären Strahlen weniger stark gebrochen werden, als die extraordinären, und da nach §. 269 die Vibrationen der ordinären Strahlen stets rechtwinklig zur optischen Are vor sich gehen, so muß demnach bei den positiven Krystallen die Elasticität des Aethers rechtwinklig zur optischen Are ein Maximum, in den negativen Krystallen dagegen ein Minimum sein. Da ferner der Unterschied der beiden Brechungsexponenten am größten wird, wenn die Richtung des Strahls senkrecht zur optischen Are ist (§. 263), und da in diesem Falle nach §. 269 die Vibrationen des extraordinären Strahles parallel der Are erfolgen, so muß die Elasticität des Aethers in der Richtung der Are bei positiven Krystallen ein Minimum, und bei negativen ein Maximum sein.

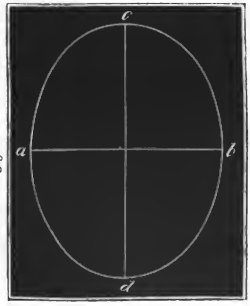


Fig. 78.

Man stelle durch a b (Fig. 78) für einen positiven Krystall die Elasticität des Aethers

Digitized by Google

in der Richtung der optischen Are, und durch cd die Elasticität rechtwinklig zur optischen Are dar, beschreibe eine Ellipse, deren kleine Are ab, und deren große Are cd ist, denke sich alsdann die ganze Figur um die Are ab gedreht, so entsteht ein Umdrehungsellipsoid. Dieses Umdrehungsellipsoid stellt nun das Gesetz dar, nach welchem sich die Elasticität des Aethers nach verschiedenen Richtungen ändert, und heißt die Elasticitätsoberfläche des Krystalls. Daß sich in dem einzelnen Falle ab und cd für einen bestimmten Krystall wie die Grenzwerthe der Brechungsexponenten desselben verhalten müssen, ist klar. Für negative Krystalle ist natürlich die Elasticitätsoberfläche ein Umdrehungsellipsoid um die große Are.

Jede durch die optische Are eines einarigen Krystalls gelegte Ebene schneidet seine Elasticitätsoberfläche in einer Ellipse, und jede auf der optischen Are rechtwinklig stehende Ebene in einem Kreise. Man begreift also jetzt sehr wohl, warum die ordinären Strahlen sich nach allen Richtungen hin mit gleicher Geschwindigkeit im Krystalle fortpflanzen, da ja ihre Vibrationen stets rechtwinklig zur optischen Are sind, und die Elasticität des Aethers nach allen auf der optischen Are rechtwinkligen Richtungen gleich sein muß.

Jede durch den Mittelpunkt der Elasticitätsoberfläche gelegte Ebene schneidet dieselbe in einer Ellipse, wenn sie nicht grade rechtwinklig auf der optischen Are steht, da in diesem Falle die Durchschnittslinie eine Kreislinie ist. Wenn nun ein Lichtstrahl rechtwinklig zu der Ebene eines solchen elliptischen Schnittes den Krystall durchläuft, so müssen die ihn fortpflanzenden Vibrationen mit der Ebene des elliptischen Schnittes parallel sein, weil sie ebenso, wie der elliptische Schnitt, senkrecht zur Richtung des Strahles sind. In welcher Richtung nun auch ein Lichtstrahl den Krystall durchlaufen mag, so wird man doch stets seine Elasticitätsoberfläche durch eine auf seiner Richtung rechtwinklige Ebene in einer Ellipse schneiden können. Die eine Are einer solchen Ellipse steht stets rechtwinklig auf der optischen Are des Krystalls, während die andere Are in die Ebene fällt, welche man durch die Richtung des Strahls und durch die Richtung der optischen Are legen kann, also in den Hauptschnitt. Da nun nach §. 269 sich nur solche Vibrationen durch den Krystall fortpflanzen können, welche mit der großen oder mit der kleinen Are des elliptischen Schnittes parallel sind, so werden also in jeder Richtung 2 Strahlen mit verschiedener Geschwindigkeit den Krystall durchlaufen können. Die Geschwindigkeit der extraordinären Strahlen hängt, da ihre Vibrationen in der Ebene des Hauptschnitts vor sich gehen, von der Richtung der Strahlen ab, denn die Aren der elliptischen Schnitte, welche in den Hauptschnitt fallen, verändern sich mit der Richtung der Schnitte, während die andern Aren in allen diesen elliptischen Schnitten gleich groß sind. Je mehr sich die Richtung der extraordinären Strahlen der Richtung der optischen Are nähert, desto mehr nähert sich der Winkel, welchen seine Vibrationen mit der optischen Are machen, einem rechten Winkel, desto weniger ist also seine Geschwindigkeit von der Geschwindigkeit der ordinären Strahlen verschieden. Fällt der extraordinäre Strahl mit der Richtung der optischen Are zusammen, dann wird natürlich dieser Unterschied der Geschwindigkeiten beider Strahlen $= 0$, woraus sich erklärt, daß in diesem Falle gar keine doppelte Brechung stattfindet.

Digitized by Google

§. 271. **Doppeltbrechende Prismen als polarisirende Apparate.** Da alle Strahlen, welche einen doppeltbrechenden Krystall durchlaufen haben, polarisirt sind, so kann man auch doppeltbrechende Prismen statt der Polarisationsspiegel oder statt der Turmalinplatten anwenden; namentlich lassen sich solche Prismen sehr gut statt des Zerlegungsspiegels gebrauchen. In diesem Falle ist es jedoch zweckmäßig, das Prisma durch ein Glasprisma zu achromatisiren, damit die prismatische Farbenzerstreuung und die Ablenkung der Bilder nicht störend wirke. Man braucht es nur mit einem Glasprisma von gleichem brechenden Winkel zusammenzukitten, so findet für die ordinären Strahlen weder eine Ablenkung, noch eine Farbenzerstreuung statt, da der Brechungsexponent und die Farbenzerstreuung im Glase denen für die ordinären Strahlen im Kalkspath ziemlich gleich ist. Sieht man durch ein so achromatisirtes Prisma nach irgend einem Gegenstande, z. B. nach einer Kerzenflamme, so sieht man 2 Bilder, von welchen das eine, das extraordinäre, noch farbige Säume zeigt, während das andere davon frei ist. Dreht man nun das Prisma vor dem Auge um, so bleibt dabei das farblose Bild ganz unverrückt stehen, während das farbig gesäumte sich um das erstere dreht. Bei vielen Versuchen würde ein solches Prisma statt des Zerlegungsspiegels unbequem sein, weil es zu gleicher Zeit 2 rechtwinklig zu einander polarisirte Strahlenbündel liefert. Auf eine sinnreiche Weise hat nun Nicol 2 Kalkspathprismen so combinirt, daß nur das eine polarisirte Strahlenbündel durch das System hindurch geht. abc und bcd (Fig. 79) seien 2 Kalkspathstücke, welche mit der wohlpolirten Fläche bc durch Kanadabalsam zusammengekittet sind. Die Fläche bc hat nun gegen die durch die Fläche cd eindringenden Strahlen eine solche Neigung, daß die stärker brechbaren ordinären Strahlen an der Balsamschicht schon eine vollständige Reflexion erleiden, während nur die weniger brechbaren extraordinären Strahlen durch die Balsamschicht hindurch in das andere Prisma gelangen, und bei ab austreten. Ein solches Prisma gibt also nur ein polarisirtes Bild.

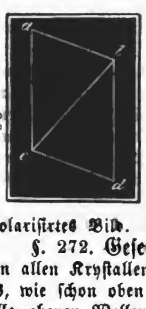


Fig. 79.

§. 272. **Gesetze der doppelten Brechung in zweiaxigen Krystallen.** In allen Krystallen, welche zu den 3 letzten Krystallsystemen gehören, gibt es, wie schon oben (§. 267) bemerkt wurde, 2 Richtungen, in welchen sich alle ebenen Wellen mit derselben Geschwindigkeit fortpflanzen, d. h. sie haben alle 2 optische Axen. In den zweiaxigen Krystallen gibt es keinen ordinären Strahl mehr, d. h. keinen, welcher den Krystall nach allen Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit durchläuft; keiner der beiden Strahlen also, in welche ein einfallender Lichtstrahl bei seinem Eintritt in den zweiaxigen Krystall gespalten wird, folgt den Gesetzen der gewöhnlichen Brechung.

Der Winkel, welchen die Richtungen der beiden optischen Axen mit einander machen, ist nicht für alle Krystalle gleich, sondern kann alle möglichen Werthe zwischen 0° und 90° haben (Weißbleierz oder kohlensaures Bleioxyd 5° 15′, Eisenvitriol 90°). Diejenige Linie, welche den spitzen Winkel der beiden optischen Axen halbirt, heißt die Mittellinie. Bei den zweiaxigen Krystallen findet keine so einfache Beziehung zwischen der Lage der krystallographischen Axen und den optischen Axen statt, wie bei den

Digitized by Google

einarigen Krystallen. Nur bei denjenigen Krystallen, welche zu dem rhombischen Krystallsysteme gehören, läßt sich überhaupt eine feste Beziehung nachweisen. Die Mittellinie aller in dieses System gehörigen Körper fällt stets mit einer der krystallographischen Aren, und die Ebene der optischen Aren mit der Ebene zweier krystallographischen Aren zusammen.

Fresnel hat die Erscheinungen der doppelten Brechung in zweiarigen Krystallen aus folgender Annahme über die Elasticität des Aethers abgeleitet: Die Elasticität des Aethers ist in zweiarigen Krystallen weder nach allen Richtungen dieselbe, wie bei den einfach brechenden Mitteln, noch gibt es in denselben eine Are, um welche herum die Elasticität des Aethers ganz symmetrisch ist, wie bei den einarigen Krystallen.

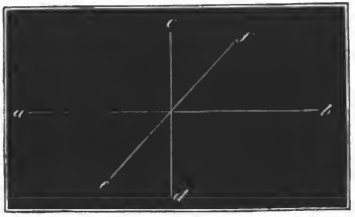


Fig. 80.

Es sei ab (Fig. 80) die Are der größten Elasticität in einem zweiarigen Krystall, so steht die Are der kleinsten Elasticität cd rechtwinklig darauf. Rechtwinklig zur Ebene dieser beiden Aren ist nun die Elasticität des Aethers kleiner, als a b, und größer, als c d. Wir wollen die Are e f die Are der mittleren Elasticität nennen. Denken wir uns nun über diese 3 Aren ein Ellipsoïd beschrieben, so kann man mit Hilfe desselben das Gesetz entwickeln, nach welchem sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Strahlen mit der Richtung ändert. Wenn man nämlich durch den Mittelpunkt des Ellipsoïds eine Ebene gelegt denkt, so ist der Durchschnitt derselben mit dem Ellipsoïd stets eine Ellipse. Errichtet man nun in der Mitte des elliptischen Schnittes ein Perpendikel auf die Ebene desselben, und trägt auf demselben die Länge der großen und der kleinen Are des elliptischen Schnittes auf, so sind diese beiden Längen die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der beiden Strahlen in der Richtung dieses Perpendikels.

§. 273. **Doppelte Brechung des zusammengedrückten Glases.** Auch Körper, welche gewöhnlich keine doppelte Brechung zeigen, können zu doppeltbrechenden gemacht werden, wenn man durch äußere Ursachen, etwa durch einen einseitigen Druck, durch eine ungleiche Erwärmung, die gegenseitige Anordnung der Theilchen in einigen Richtungen verändert, wodurch denn auch die Elasticität des Aethers in diesen Richtungen mitverändert wird. Um diese wichtige Wahrheit nachzuweisen, hat Fresnel folgenden Versuch ersonnen. Es werden 4 rechtwinklige, vollkommen gleiche Glasprismen auf eine horizontale Ebene mit denjenigen Flächen neben einander gelegt, welche den rechten Flächenwinkeln gegenüberliegen. Von beiden Seiten legt man nun gegen die Enden Streifen von Kartenpapier, und auf dieselben feste Stahlstreifen. Dann werden die Prismen in einer passenden Zwenge durch einen Druck zusammengepreßt, welcher auf die Prismen in der Richtung ihrer Längenare wirkt. Während nun die Theilchen der Glasprismen durch den starken Druck in einem gespannten Zustande erhalten werden, legt man 3 rechtwinklige Glasprismen in die durch die ersteren gebildeten Rinnen, setzt dann auch noch auf beiden Seiten zwei Prismen

Digitized by Google

von 45° an, um so ein Parallelopiped zu erhalten, dessen äußerste Seiten einander parallel sind. Alle Prismen sind endlich zusammengekittet, um partielle Reflexionen an den verschiedenen Flächen zu vermeiden. Sieht man durch dieses System hindurch, so erblickt man einen Vistrpunkt, welcher ungefähr ein Meter weit von dem Auge entfernt ist, doppelt.

Bei der Betrachtung der Farbenerscheinungen, welche doppeltbrechende Körper im polarisirten Lichte zeigen, werden wir noch andere Erscheinungen kennen lernen, welche von einer doppelten Brechung in nicht krystallisirten Körpern herrühren. Wenn aber auch eine durch künstliche Mittel hervorgebrachte doppelte Brechung stark genug ist, um solche Farbenerscheinungen hervorzubringen, so ist sie doch in der Regel zu schwach, um direct beobachtet werden zu können.

Neuntes Kapitel.

Farben doppeltbrechender Krystallplatten im polarisirten Lichte.

§. 274. **Farben dünner Gypsblättchen.** Der natürliche Gyps findet sich häufig in großen durchsichtigen Krystallen, welche nach einer Richtung hin so vollkommen spaltbar sind, daß man leicht ganz dünne Blättchen abspalten kann. Bringt man ein durch Spaltung erhaltenes, recht dünnes Gypsblättchen (es darf nicht über 0,3 Millimeter dick sein) zwischen die beiden Spiegel eines Polarisationsapparates, so wird es mehr oder weniger brillant gefärbt erscheinen. Je nachdem man das Gypsblättchen selbst oder den Zerlegungsspiegel dreht, ändert sich entweder die Intensität der Färbung, oder auch die Färbung selbst. Wenn das Gypsblättchen vollkommen ebene Oberflächen hat, so erscheint es im Polarisationsapparate einfarbig; ist aber die Oberfläche unrein, d. h. sind beim Abspalten Splitter darauf hängen geblieben, so erscheint das Blättchen an verschiedenen Stellen verschieden gefärbt. Es geht daraus hervor, daß die Färbung des Gypsblättchens von seiner Dicke abhängt. Deßwegen zeigt auch ein keilförmig zugeschliffenes Gypsblättchen, welches an dem einen Ende gleichsam mit einer Schneide endigt, alle die Farben in regelmäßiger Aufeinanderfolge, welche den verschiedenen Dicken zukommen. Auch mit einarigen Krystallblättchen (der Gyps ist zweiarig), welche parallel mit der optischen Are geschliffen und hinlänglich dünn sind, sowie mit Blättchen von andern zweiarigen Krystallen, deren Oberflächen parallel der Ebene der optischen Aren sind, lassen sich dieselben Versuche anstellen; nur eignen sich die Gypsblättchen der leichten Spaltbarkeit dieses Minerals wegen ganz besonders dazu.

Wir wollen zunächst den Fall betrachten, daß die beiden Spiegel des Apparates gekreuzt sind. Das Blättchen erscheint, wie schon bemerkt, farbig. Dreht man es in seiner Ebene um eine verticale Are, so wird die Färbung des Blättchens bald lebhafter werden, bald an Intensität abnehmen, und man wird leicht eine bestimmte Stellung ermitteln können, bei welcher das Blättchen selbst ganz so dunkel erscheint, wie der Grund, eine Lage also, in welcher das Gypsblättchen gar keine sichtbare Wirkung auf die durchgehenden Strahlen hervorbringt.

Digitized by Google

Legt man aber das Gypsblättchen so, daß es bei gekreuzten Spiegeln möglichst lebhafte Farben zeigt, dreht man alsdann den oberen Spiegel, so wird die Farbe blasser und blasser, d. h. mehr dem Weiß sich nähernd. Hat man um 45° gedreht, so scheint das Gypsblättchen ganz farblos. Dreht man weiter, so erscheint die complementäre Farbe, welche am brillantesten wird, wenn die Spiegel parallel sind.

§. 275. **Erscheinung bei Anwendung von homogenem Licht.** Sieht man durch ein rothes Glas nach dem Zerlegungsspiegel, so werden diejenigen Gypsblättchen, welche im weißen Lichte roth erscheinen, hell auf dunklem Grunde stehen; alle die Blättchen hingegen, welche im weißen Lichte eine andere Farbe zeigen, erscheinen weniger hell, die grünen am dunkelsten. Nehmen wir statt der einfarbigen Blättchen bunte, so erscheinen diese gefleckt. Diejenigen Stellen sind die hellsten, die im weißen Lichte roth erscheinen, am dunkelsten aber sind die sonst grünen Stellen. Am vollständigsten sieht man die Erscheinung in der keilförmig zugeschliffenen Platte. Durch das rothe Glas gesehen, bemerkt man nur abwechselnd helle und dunkle Streifen.

§. 276. **Erklärung dieser Erscheinungen.** Die Gypskrystalle sind, wie schon erwähnt, nach einer Richtung vollkommen spaltbar, sie besitzen aber nach 2 anderen Richtungen noch eine unvollkommene Spaltbarkeit. Man kann demnach aus einem Gypsblättchen leicht ein Stückchen in Form eines Rhombus herausspalten.

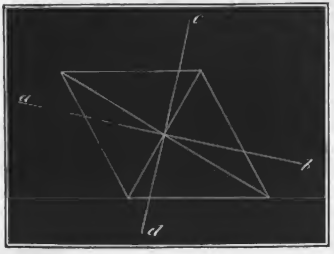


Fig. 81.

Bringt man nun einen solchen Rhombus in den Apparat bei gekreuzten Spiegeln, so findet man, daß das Gypsblättchen durchaus keine Wirkung hervorbringt, wenn eine Linie ab (Fig. 81), welche mit der Halbirungslinie des spitzen Winkels einen Winkel von nahe 20° macht, mit der Polarisationsebene des unteren Spiegels zusammenfällt, oder darauf rechtwinklig steht. In jeder anderen Lage erscheint es gefärbt, und zwar am lebhaftesten, wenn ab einen Winkel von 45° mit der Reflexionsebene des unteren Spiegels macht. Die beiden optischen Axen liegen in der Ebene des Blättchens. Ein jeder Lichtstrahl, welcher ein Gypsblättchen trifft, wird, wie bei allen doppeltbrechenden Körpern, in 2 gespalten, welche rechtwinklig zu einander polarisirt sind, welche aber, wenn die einfallenden Strahlen, wie das beim Polarisationsapparate der Fall ist, rechtwinklig auf das Blättchen fallen, dasselbe in gleicher Richtung durchlaufen. Die Vibrationen, welche den einen Strahl im Krystall fortpflanzen, sind parallel ab, die Vibrationen des anderen Strahls parallel cd. Legt man nun das Gypsblättchen so zwischen die gekreuzten Spiegel, daß die Linie ab mit der Schwingungsebene des unteren Spiegels zusammenfällt, so kann der einfallende Strahl offenbar nur Schwingungen nach ab im Krystalle hervorrufen, nicht aber nach cd, eben weil die Schwingungsrichtung cd auf der Schwingungsrichtung der einfallenden Strahlen recht-

Digitized by Google

winklig steht. In diesem Falle pflanzt sich in der That nur ein polarisirter Strahl durch den Krystall fort, der nach ab schwingende, und da der obere Spiegel diese Schwingungen nicht reflectirt, so muß das Gypsblättchen bei dieser Lage dunkel erscheinen. Ebenso erklärt sich auch, daß das Gypsblättchen dunkel bleibt, wenn die Linie cd mit der Schwingungsebene des unteren Spiegels zusammen fällt.

§. 277. **Fortsetzung.** Gehen wir nun zu dem Falle über, in welchem die lebhaftesten Farben erscheinen, nämlich zu dem Falle, daß jede der Linien ab und cd einen Winkel von 45° mit der Schwingungsebene des unteren Spiegels macht, und setzen der Einfachheit wegen Beobachtung bei homogenem Lichte voraus.

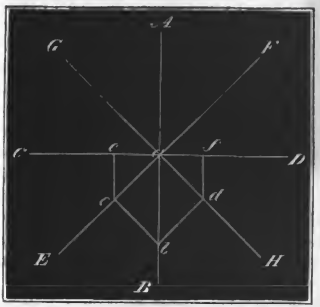


Fig. 82.

Es sei AB (Fig. 82) die Schwingungsebene des einfallenden polarisirten Strahles, CD die des Zerlegungsspiegels. Die Schwingungsebenen EF und GH der beiden Strahlen im Gypsblättchen sollen den rechten Winkel halbiren, welchen die Ebenen AB und CD mit einander machen. ab sei die Vibrationsintensität des auf das Gypsblättchen fallenden polarisirten Strahles, so findet man die Vibrationsintensität der beiden Strahlen, in welche sich das einfallende Licht beim Eintritt in das Blättchen spaltet, wenn man von b die Perpendikel bc und bd auf die Richtungen EF und GH fällt. Mit der Vibrationsintensität ac pflanzt sich nun der eine, mit der Vibrationsintensität ad der andere Strahl durch das Gypsblättchen fort. Weil nun im Gypse die Elasticität des Aethers in den beiden Ebenen EF und GH nicht gleich ist, so ist auch die Wellenlänge in der einen Ebene nicht so groß, wie in der anderen. Dadurch ist natürlich auch die Anzahl der Wellen, welche die beiden Strahlen bei ihrem Durchgang durch das Blättchen machen, nicht gleich. Der Unterschied dieser Anzahl muß sich selbstverstanden mit der Dicke des Blättchens ändern. Wir wollen hier zuerst ein Blättchen von der Dicke voraussetzen, daß der eine Strahl bei seinem Durchgange grade eine Welle mehr macht, als der andere. Dann werden die beiden Strahlen auch noch bei ihrem Austritt aus dem Blättchen sich in gleichen Schwingungszuständen befinden, und während der eine z. B. von a nach c schwingt, wird der andere von a nach d schwingen. Die Vibrationen ac und ad werden aber durch den oberen Spiegel von Neuem zerlegt; ac ruft in der Schwingungsebene des Zerlegungsspiegels eine Bewegung von a nach e hervor, und ad eine Bewegung von a nach f. Jede der Vibrationen ae und af erzeugt in der Ebene CD ein Wellensystem, allein weil die Bewegungen in beiden Wellensystemen stets grade entgegengesetzt sind, so heben sie ihre Wirkung gegenseitig auf, die Intensität des resultirenden Strahles muß demnach gleich Null sein. Dasselbe muß natürlich auch der Fall sein, wenn das Blättchen die dop-

Digitized by Google

pelte, dreifache, vierfache u. s. w. Dicke hat, so daß ein Strahl dem anderen um 2, 3, 4 u. s. w. Wellenlängen vorauseilt.

Wir wollen uns jetzt ein nur halb so dickes Blättchen denken, also ein solches, in welchem der eine Strahl dem anderen nur um eine halbe Wellenlänge voraneilt.

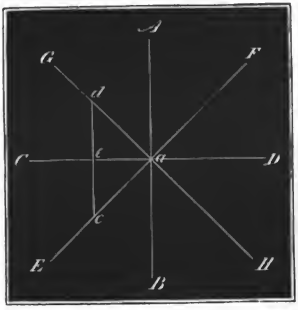


Fig. 83.

Bei dem Austritt aus dem Gypsblättchen wird jetzt der eine Strahl grade in entgegengesetzten Schwingungszuständen sich befinden, wie der andere; während also der eine Strahl z. B. beim Austritt von a nach c (Fig. 83) schwingt, wird der andere von a nach d schwingen. Zerlegt man nun diese beiden Vibrationen nach der Schwingungsebene des oberen Spiegels, so erhält man 2 Wellensysteme, von welchen sowohl das eine, wie das andere, eine Bewegung von a nach e hervorruft. Die beiden Wellensysteme, auf die Schwingungsebene des oberen Spiegels reducirt, heben sich also nicht auf, sondern sie verstärken sich. Ein solches Gypsblättchen muß also unter den erwähnten Umständen hell erscheinen. Dasselbe wird stattfinden müssen, wenn das Blättchen so dick ist, daß der eine Strahl dem anderen um $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{2}$, $\frac{7}{2}$ u. s. w. Wellenlängen vorauseilt.

Es erklären sich also aus diesem §. die abwechselnd dunkeln und hellen Streifen der keilförmig geschliffenen Gypsplatte.

§. 278. **Fortsetzung.** Ganz wie in dem §. 260 wird nun bewiesen, daß die Vibrationsintensität der Wellensysteme, welche die beiden Strahlen im Gypsblättchen nach der Zerlegung durch den oberen Spiegel liefern, am größten sein muß, wenn die Schwingungsebenen im Gypsblättchen den Winkel halbiren, welchen die Schwingungsebenen der beiden Spiegel mit einander machen, und daß demnach für diesen Fall die Intensität der hellen Streifen am größten sein muß. Je mehr sich aber die Schwingungsebenen im Gypsblättchen den Schwingungsebenen der Polarisationsspiegel nähern, desto geringer wird die Vibrationsintensität des Strahlenbündels, welches jeder der beiden Strahlen im Gypsblättchen nach der Zerlegung durch den oberen Spiegel liefert. Wenn aber die Intensität der interferirenden Strahlenbündel geringer wird, so muß auch die Intensität der Färbung geringer werden, welche durch die Interferenz hervorgebracht wird.

Da die Wellenlängen für violettes Licht kürzer sind, als für rothes, so wird auch eine andere Stelle der keilförmigen Platte den ersten dunkeln Streifen für violettes Licht zeigen, und zwar eine solche, deren Dicke in demselben Verhältniß geringer ist, in welchem die violetten Lichtwellen kürzer sind, als die rothen. Dasselbe gilt auch für andere Farben, und man sieht, daß hier genau dieselben Verhältnisse stattfinden, wie bei den Farben dünner Schichten. Welche Farbe ein Blättchen von gegebener Dicke im weißen Lichte zeigen muß, kann daher auch auf dieselbe Weise bestimmt

Digitized by Google

werden, wie dies in §. 248 für die verschiedenen Dicken dünner Schichten gelehrt ist.

§. 279. **Fortsetzung.** Daß das Gypsblättchen farblos erscheint, wenn die Reflexionsebene des oberen Spiegels mit derjenigen des unteren einen Winkel von 45° macht, ist leicht einzusehen. Denn in diesem Falle fällt die Schwingungsebene des oberen Spiegels mit der Schwingungsebene des einen Strahls im Krystalle zusammen. Der Spiegel pflanzt also diese Schwingungen fort. Die Schwingungen des andern Strahls im Krystall sind aber rechtwinklig zu der Schwingungsebene des oberen Spiegels, sie werden also von diesem Spiegel gar nicht fortgepflanzt. Sie können daher auch mit den reflectirten Strahlen nicht interferiren, die Ursache der Farbenerscheinung hört auf.

§. 280. **Fortsetzung.** Die beiden Spiegel seien jetzt parallel. Wir müssen uns also in Fig. 82 (§. 277) C D nicht rechtwinklig auf A B, sondern damit zusammenfallend denken. Wenn dann die Vibrationen a c und a d nach C D zerlegt werden, so erzeugen jetzt beide eine Vibration in derselben Richtung (in der Richtung von a nach b zu). Die beiden Wellensysteme müssen sich also gegenseitig unterstützen. Denken wir uns ebenso in Fig. 83 C D nicht rechtwinklig auf A B, sondern ebenfalls damit zusammenfallend, und zerlegen dann die Vibrationen a c und a d nach C D, so erzeugt a c eine Vibration von a nach B hin, und die andere a d eine Vibration von a nach A hin; sie erzeugen also Vibrationen nach entgegengesetzter Richtung, und die beiden Wellensysteme müssen sich gegenseitig aufheben. Für einfarbiges Licht erscheinen also zwischen parallelen Spiegeln diejenigen Stellen hell, welche grade so dick sind, daß ein Strahl im Krystall dem anderen um eine ganze oder um mehrere ganze Wellenlängen voraneilt. Zwischen parallelen Spiegeln werden demnach grade diejenigen Stellen der keilförmigen Platte hell erscheinen, welche zwischen gekreuzten dunkel waren. Diejenigen aber, welche zwischen gekreuzten Spiegeln hell erschienen, sind nun dunkel.

Nehmen wir nun weißes Licht statt des einfarbigen, so werden bei parallelen Spiegeln grade diejenigen Farben in der Färbung des Gypsblättchens vorherrschen, welche ihm bei gekreuzten Spiegeln fehlen; diejenigen aber werden hier den geringsten Einfluß auf die Färbung ausüben, welche bei gekreuzten Spiegeln vorherrschen. Dem zu Folge findet zwischen der Farbe, welche ein Gypsblättchen zwischen gekreuzten, und derjenigen, welche es zwischen parallelen Spiegeln zeigt, eine solche Beziehung statt, daß sie sich gegenseitig zu Weiß ergänzen. Es sind also Complementärfarben, welche hier in größter Reinheit und Schönheit sich zeigen. Ersetzt man den Zerlegungsspiegel durch ein doppeltbrechendes Prisma, so sieht man 2 Bilder des Gypsblättchens, welche complementär gefärbt sind. Die Stelle, wo die beiden Bilder über einander fallen, erscheint weiß.

§. 281. **Erscheinungen gekreuzter Gypsblättchen zwischen gekreuzten Spiegeln.** Wenn man 2 Gypsblättchen so auf einander legt, daß die entsprechenden Schwingungsebenen in beiden zusammenfallen, so werden sie offenbar solche Erscheinungen hervorbringen, als ob man eine einzige Platte angewandt hätte, deren Dicke gleich ist der Summe der Dicken der beiden einzelnen Blättchen. Legt man aber die Blättchen so auf einander, daß sich die entsprechenden Schwingungsebenen unter einem rechten Winkel kreuzen,

Digitized by Google

daß also die Schwingungsebene der geringsten Elasticität im einen mit der Schwingungsebene der größten Elasticität im anderen zusammenfällt, so wird der Strahl, welcher in dem einen Blättchen voraneilte, im anderen zurückbleiben. Sind nun die gekreuzten Blättchen gleich dick, so wird das Voraneilen in dem einen Blättchen dem Zurückbleiben im anderen gleich sein, das eine Blättchen hebt die Wirkung des anderen auf, es ist grade so, als ob man gar kein Gypsblättchen in den Apparat gebracht hätte. Die Stelle, an welcher die Blättchen über einander liegen, erscheint ganz dunkel, während die freien Ecken gleich gefärbt sind. Sind die Blättchen nicht gleich dick, so werden sie, auf die angegebene Weise gekreuzt, Farben zeigen, und zwar gerade diejenige Farbe, welche der Differenz ihrer Dicke entspricht.

§. 282. **Farbige Ringe in einaxigen Krystallen.** Wenn man eine Kalkspathplatte, welche rechtwinklig zur optischen Axe geschliffen ist, zwischen die beiden Turmalinplatten einer Turmalinzange bringt, und dann, indem man den Apparat dicht vor das Auge hält, nach dem hellen Himmel oder irgend einer recht hellen Fläche sieht, so erblickt man ein prächtiges, farbiges Ringsystem. Wenn die Turmalinplatten gekreuzt sind, so ist dieses Ringsystem von einem schwarzen Kreuze durchzogen. Sind aber die Turmalinplatten so gestellt, daß ihre Polarisationsebenen parallel sind, so sind an den entsprechenden Stellen alle Farben complementär, weßhalb auch hier statt des schwarzen Kreuzes ein weißes erscheint. Der Durchmesser der Ringe hängt von der Dicke der Platten ab, er ist der Quadratwurzel aus der Dicke umgekehrt proportional. Auch die anderen einarigen Krystalle, den Bergkrystall ausgenommen (s. weiter unten §. 298), zeigen ganz dieselbe Erscheinung, nur sind für gleich dicke Platten die Ringe um so enger, je stärker die doppelte Brechung der Substanz, d. h. je größer der Unterschied zwischen dem größten und kleinsten Brechungsexponenten für dieselbe ist. Außer dem Kalkspath sind noch besonders folgende einarige Krystalle zur Beobachtung des Ringsystems geeignet: schwefelsaures Nickeloxyd, Blutlaugensalz, salpetersaures Natron, Turmalin, Honigstein, essigsaures Kalkkupfer, Eis.

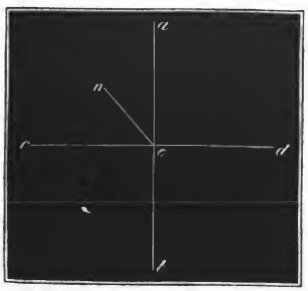


Fig. 84.

§. 283. **Erklärung dieser Erscheinung.** Die Ebene des Papiers stelle die Oberfläche des zwischen die Turmalinplatten gelegten Krystalls vor. Das Auge des Beschauers befinde sich grade über o (Fig. 84), die Richtung des rechtwinklig durch die Platte gehenden Strahls erscheint also in unserer Figur zu einem Punkte o verkürzt. ab sei die Schwingungsrichtung der ersten, cd die der zweiten Turmalinplatte. Wenn nun die Krystallplatte rechtwinklig auf die Axe geschnitten ist, so gehen die Strahlen, welche rechtwinklig zu den Oberflächen durch die Platten sich bewegen, in der Richtung der optischen Axe hindurch. In dieser Richtung findet aber keine Spaltung in zwei Strahlen statt. Die Mitte des Gesichtsfeldes wird

Digitized by Google

also grade so erscheinen, als ob gar keine Krystallplatte zwischen den gekreuzten Turmalinen wäre, sie muß dunkel erscheinen. Es sei n irgend ein anderer Punkt der Oberfläche des Krystalls. Die hier austretenden und nach dem über o stehenden Auge gelangenden Strahlen haben die Platte nicht in der Richtung der optischen Axe durchlaufen. Bei n tritt also ein ordinärer und ein extraordinärer Strahl aus der Platte; der eine Strahl ist dem anderen vorangeeilt. Nach der Zerlegung durch die obere Turmalinplatte tritt also ganz derselbe Fall ein, wie für ein Gypsblättchen zwischen den gekreuzten Spiegeln des Polarisationsapparates. Während der Punkt o dunkel erscheint, wird der Punkt n eine Farbe haben, deren Natur davon abhängt, um wie viele Wellenlängen der eine Strahl dem anderen vorangeeilt ist.

Wir wollen nun den Gang der beiden in n austretenden Strahlen etwas genauer betrachten.

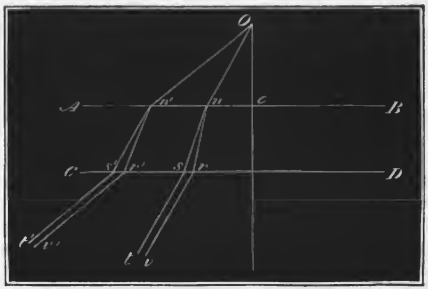


Fig. 85.

ABCD (Fig. 85) sei der Durchschnitt der Krystallplatte mit einer Ebene, welche durch die Linie no und das Auge O geht. Wenn von O ein Lichtstrahl On auf die Krystallplatte fiele, so würde er bei seinem Eintritt in den Krystall in zwei Strahlen ns und nr gespalten werden, welche nach st und rv parallel mit On austreten. Wenn also umgekehrt ein Lichtstrahl ts auf die Platte fällt, so wird er in zwei Strahlen gespalten, von denen nur der extraordinäre (ein Kalkspathkrystall ist vorausgesetzt, und bei diesem wird der ordinäre Strahl stärker gebrochen, als der extraordinäre) nach n gelangt. Ein zweiter Strahl vr aber, welcher die Platte trifft, sendet einen ordinären Strahl nach n. Bei n tritt also ein ordinärer und ein extraordinärer Strahl in der Richtung nO aus. Der Unterschied der Wege ns und nr ist so gering, daß man ihn ganz unberücksichtigt lassen kann, aber auf dem einen von ihnen liegen weniger Wellenlängen, als auf dem anderen, eben weil der eine der Weg eines ordinären, und der andere der Weg eines extraordinären Strahles ist, und diese verschiedene Wellenlängen haben.

Wir wollen annehmen, der eine Strahl sei dem andern um eine Wellenlänge vorangeeilt. Die Strahlen, welche von einem Punkte n' der Oberfläche des Krystalls in das Auge gelangen, der noch weiter von o entfernt ist, als n, haben den Krystall in einer Richtung durchlaufen, welche mit der optischen Axe einen noch größeren Winkel macht, als die Richtung der bei n austretenden Strahlen; folglich ist die Wellenlänge der beiden bei n' austretenden Strahlen im Krystall noch mehr von einander verschieden, als dies für die bei n austretenden der Fall war, das Voraneilen des einen Strahls ist also noch bedeutender. Wir wollen annehmen,

Digitized by Google

daß der eine Strahl dem anderen um zwei Wellenlängen vorausgeeilt sei. Wie wird nun diese Platte bei homogenem Lichte zwischen den Turmalinplatten erscheinen müssen? Offenbar muß etwas Aehnliches stattfinden, wie bei einer keilförmigen Gypsplatte in dem Polarisationsapparate. Zwischen den gekreuzten Turmalinen muß die Stelle o dunkel erscheinen, weil von den hier austretenden Strahlen keiner dem anderen vorausgeeilt ist, denn sie haben den Krystall in der Richtung der optischen Are durchlaufen. Die Stelle n wird ebenfalls dunkel erscheinen, sie entspricht der Stelle des Gypskeiles, welche so dick ist, daß der eine Strahl dem anderen um eine Wellenlänge vorangeeilt ist. Ebenso erscheint n′ dunkel, dieser Punkt entspricht dem zweiten dunkeln Streifen des Gypskeiles. Zwischen o und n ist eine Stelle, an welcher ein ordinärer und ein extraordinärer Strahl nach dem Auge hin austreten, von welchen der eine dem anderen um $\frac{1}{2}$ Wellenlänge vorausgeeilt ist; diese Stelle wird also hell erscheinen. Ebenso befindet sich eine helle Stelle zwischen n und n′, wo der eine Strahl dem anderen um $\frac{3}{2}$ Wellenlängen vorausgeeilt ist. Denken wir uns um o auf der Oberfläche des Krystalls mit dem Radius on einen Kreis gezogen, so werden alle Strahlen, welche von dem Umfange dieses Kreises in das Auge gelangen, sich ebenso verhalten, wie die von n herkommenden, denn alle diese Strahlen haben den Krystall in gleicher Neigung gegen die optische Are durchlaufen. Wenn also der Punkt n dunkel erscheint, so erscheint der ganze Umfang dieses Kreises dunkel. Um den dunkeln Mittelpunkt o erscheint demnach zunächst ein heller Kreis, dann ein dunkler, dessen Radius on ist, auf diesen folgt wieder ein heller Ring, dann ein zweiter dunkler Ring mit dem Radius on′ u. s. w. Sieht man daher durch die zwischen gekreuzte Turmalinplatten gelegte Platte nach einer monochromatischen Flamme, so sieht man eine Reihe von concentrischen Kreisen, welche immer feiner und feiner werden. Wenn man statt des einfarbigen Lichtes weißes Licht anwendet, so erblickt man natürlich statt der hellen und dunklen Ringe eine Reihe verschiedenfarbiger Ringe, welche von dem Mittelpunkte aus in derselben Ordnung auf einander folgen, wie die Farben der keilförmigen Gypsplatte.

§. 284. **Fortsetzung.** Wie kommt das schwarze Kreuz? Bei den Gypsblättchen sahen wir, daß die Intensität der Färbung davon abhängt, welche Lage die Schwingungsebenen im Krystalle gegen die Schwingungsebenen der beiden Spiegel, oder, in unserem Falle, der beiden Turmalinplatten haben (§. 278). Bei den Gypsblättchen sind die Schwingungen aller durchgehenden Strahlen mit 2 bestimmt anzugebenden Linien parallel, bei einer senkrecht auf die Are geschliffenen Krystallplatte aber ist dies nicht der Fall.

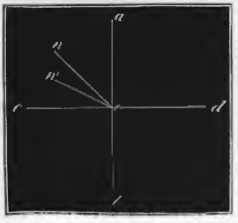


Fig. 86.

Von einem Punkte n (Fig. 86) der Oberfläche eines senkrecht auf die Are geschliffenen einarigen Krystalls tritt ein ordinärer und ein extraordinärer Strahl nach dem über o befindlichen Auge aus. Die Ebene, welche sich durch den Punkt n und die in o zum Punkte verkürzte Richtung der optischen Are legen läßt, ist der Hauptschnitt für diesen Strahl (§. 269). Die Schwingungen des extraordinären Strahles finden nun in diesem hier zur Linie no verkürzten Hauptschnitte selbst

Digitized by Google

ſtatt, und die des ordinären ſind rechtwinklig auf demſelben. Für einen anderen Punkt n' der Oberfläche iſt aber n'o die Projection des Hauptſchnittes, die Schwingungsebenen der von n' nach dem Auge gelangenden Strahlen haben alſo eine andere Lage, als die Schwingungsebenen der von n kommenden Strahlen. Wenn nun der Punkt n ſo liegt, daß no einen Winkel von 45° mit den Schwingungsebenen ab und cd der beiden Turmalinplatten macht, ſo werden die Farben an der Stelle n ein Maximum von Helligkeit zeigen. Je mehr aber die von dem Austrittspunkte nach o gezogene grade Linie ſich ab oder cd nähert, deſto dunkler wird die Färbung werden. Vollkommne Dunkelheit muß endlich an allen Punkten der Linien ab und cd ſelbſt ſtattfinden. Dieſe bilden aber zuſammen das ſchwarze Kreuz.

Daß zwiſchen parallelen Turmalinen die complementäre Figur mit dem weißen Kreuze erſcheint, bedarf nach dem, was §. 280 geſagt iſt, keiner weiteren Erklärung.

§. 285. **Warum werden die Farbenringe nicht in dem Polariſationsapparate geſehen?** Wenn die Kryſtallplatte im Polariſationsapparate ſich befindet, ſo können nur ſolche Strahlen, welche nahezu rechtwinklig durch die Platte gegangen ſind, zum oberen Spiegel und von da zum Auge gelangen. Betrachtet man das Auge als die Spitze eines Kegels, deſſen Grundfläche die im Apparate befindliche Kryſtallplatte iſt, ſo iſt dieſer Kegel ein ſehr ſpitzer. Die Strahlen, welche von dem Rande des Blättchens in das Auge gelangen, haben faſt dieſelbe Richtung, wie die durch ſeine Mitte gegangenen. Legt man aber eine Kryſtallplatte in die Turmalinzange, und bringt man dieſe dicht an das Auge, ſo überſieht man ein größeres Feld, d. h. außer ſolchen Strahlen, welche rechtwinklig oder nahe rechtwinklig durch die Kryſtallplatte gingen, gelangen auch noch ſolche Strahlen in das Auge, welche die Platte in ſehr ſchräger Richtung durchlaufen haben, und die Geſammtheit aller durch die Platte in das Auge gelangenden Strahlen bildet einen ziemlich ſtumpfen Kegel.

§. 286. **Farbenringe in zweiaxigen Kryſtallen.** Wenn man eine Salpeterplatte, welche ſenkrecht auf die Mittellinie geſchliffen iſt, ſo zwiſchen die gekreuzten Turmalinplatten legt, daß die Ebene der beiden optiſchen Aren einen Winkel von 45° mit den Schwingungsebenen der beiden Turmalinplatten macht, ſo ſieht man ebenfalls ein ſchönes Ringſyſtem, welches von 2 ſchwarzen hyperboliſchen Büſcheln durchſchnitten iſt. Das Ringſyſtem beſteht offenbar aus einer Verbindung von 2 Ringſyſtemen, von welchen jedes eine optiſche Are umgibt. Herſchel hat gezeigt, daß die farbigen Curven Lemniscaten ſind, d. h. krumme Linien, welche die Eigenſchaft haben, daß, wenn man von irgend einem Punkte einer ſolchen Curve grade Linien nach den beiden Mittelpunkten gezogen denkt, das Produkt dieſer beiden Linien eine conſtante Größe iſt. Auch hier werden die Curven um ſo weiter, je dünner die Kryſtallplatte wird. Deßhalb muß mit abnehmender Dicke auch die Zahl der geſchloſſenen Curven, welche um jede Are herumgehen, immer mehr abnehmen, ja man kann die Salpeterplatte leicht ſo dünn ſchleifen, daß gar keine Ringe mehr erſcheinen, welche nur eine Are umgeben, ſondern nur ovale Ringe, welche zugleich beide Aren umſchließen. Wenn man die Salpeterplatte in ihrer Ebene umdreht, ſo bleibt dabei die Form der Lemniscaten ganz unverändert, nur die Form und die Lage

Digitized by Google

der hyperbolischen schwarzen Büschel, welche die farbigen Curven durchschneiden, ändert sich.

Wenn der Winkel, welchen die beiden optischen Axen eines Krystalls mit einander machen, größer ist, als 20°, so kann man in einer senkrecht zur Mittellinie geschliffenen Platte die ganze Erscheinung nicht mehr gleichzeitig übersehen. Neigt man die Platte bald nach der einen, bald nach der anderen Seite hin, so sieht man bald Ringe, welche die eine, bald die Ringe, welche die andere Axe umgeben (Topas).

Wenn der Winkel der optischen Axen groß ist, so ist es vortheilhafter, die Krystallplatte nicht senkrecht zur Mittellinie, sondern senkrecht zu einer der optischen Axen zu schleifen. Man sieht alsdann freilich nur ein Ringsystem. Die runden oder etwas ovalen Ringe sind nur von einem dunkeln Büschel durchschnitten, welcher seine Lage ändert, wenn man die Krystallplatte in ihrer Ebene umdreht. Jedoch ist die Richtung, nach welcher sich der schwarze Büschel dreht, der Richtung entgegengesetzt, in welcher die Krystallplatte gedreht wird (Zucker, saures chromsaures Kali).

§. 287. **Ungleiche Lage der optischen Axen für verschiedenfarbige Strahlen.** In manchen Krystallen zeigen die Ringsysteme eine auffallende Abweichung von der normalen Gestalt, wie dies namentlich bei dem Seignettesalz (weinsteinsaures Kali-Natron) der Fall ist. Wenn man eine Platte dieses Salzes hat, welche senkrecht auf die eine Axe geschnitten ist, so herrscht auf der einen Seite des Ringsystems entschieden eine rothe, und auf der anderen eine blaue Färbung vor. Nach der blau-grünen Seite hin werden die Ringe, namentlich die inneren, auffallend schmäler, so daß sie fast ein birnförmiges Ansehen erhalten. Alle diese Unregelmäßigkeiten verschwinden aber, sobald man statt des weißen Lichtes einfarbiges anwendet (wenn man z. B. nach einer Weingeistflamme hinsieht). Man beobachtet dann vollkommen kreisrunde concentrische Ringe. Da also für jede einzelne Farbe die Ringe vollkommen regelmäßig sind, so kann die im weißen Lichte beobachtete Unregelmäßigkeit nur daher rühren, daß die Mittelpunkte der verschiedenfarbigen Ringe nicht zusammenfallen. In der That sieht man zwei gesonderte Ringsysteme, deren Mittelpunkte nicht zusammenfallen, wenn man die Ringe durch ein farbiges Glas betrachtet, welches nur 2 Farben, etwa nur blaue und rothe Strahlen, durchläßt.

Da der Mittelpunkt der Ringe für die blauen Strahlen nicht mit dem für die rothen zusammenfällt, so ist ferner klar, daß die optischen Axen für die blauen Strahlen nicht mit den optischen Axen der rothen Strahlen zusammenfallen. Beim Seignettesalz ist diese Verschiedenheit der Lage sehr bedeutend, der Winkel der optischen Axen für die rothen Strahlen ist 76°, für die blauen aber nur 56°. Beim essigsauren Bleioxyd (Bleizucker) ist die ungleiche Lage der optischen Axen für verschiedenfarbige Strahlen ebenso auffallend, wie bei dem Seignettesalz. Ueberhaupt fallen bei fast allen zweiaxigen Krystallen die optischen Axen der verschiedenfarbigen Strahlen nicht zusammen, wenn dies auch oft nicht so auffallend ist, wie bei den zwei erwähnten Salzen.

§. 288. **Hyperbolische Curven in Krystallplatten, welche parallel mit der Axe geschliffen sind.** Wenn man eine parallel mit der Axe geschliffene Platte von Bergkrystall, welche 2 bis 4 Linien dick ist, oder eine ebenso dicke Gypsplatte in den Polarisationsapparat legt, so erscheint sie

Digitized by Google

nicht farbig, wie ein dünnes Blättchen, sondern wenn man sie in ihrer Ebene umdreht, wird sie nur abwechselnd hell und dunkel. Daß eine solche Platte, wenn ihre Dicke eine gewisse Grenze übersteigt, nicht mehr farbig erscheinen kann, geht aus der Entstehungsweise dieser Farben selbst hervor. Denn wenn man für eine so dicke Platte nach §. 248 die Farbe bestimmen wollte, so würde man finden, daß die Maxima und Minima der Lichtstärke der verschiedenen Farben in einer solchen Weise zusammenfallen, daß aus ihrer Mischung nur Weiß hervorgeht. Legt man aber die Krystallplatte in die Turmalinzange, und zwar in dieselbe Lage, bei welcher eine dünne Platte die Farben möglichst glänzend zeigen würde, so erblickt man, nach einer homogenen Lichtquelle (Weingeistflamme, auf deren Docht man etwas Salz gestreut hat) hinsehend, ein System von abwechselnd hellen und dunkeln hyperbolischen Streifen. Daß überhaupt hier abwechselnd helle und dunkle Curven entstehen, rührt daher, daß von den beiden Strahlen, welche an irgend einer Stelle der Oberfläche der Platte nach dem Auge austreten, der eine bald mehr, bald weniger vorausgeeilt ist, je nachdem die Strahlen den Krystall in einer anderen Richtung durchlaufen haben. Je dünner die Platte wird, desto weiter rücken die Curven aus einander, und wenn die Platte hinlänglich dünn geworden ist, um im weißen Lichte farbig zu erscheinen, sind die Curven gewissermaßen so groß geworden, daß man sie nicht mehr übersehen kann; man sieht alsdann nur den gleichmäßig gefärbten centralen Theil der Figur. Auch eine parallel mit der Axe geschliffene Kalkspathplatte zeigt diese Curven, nur sind sie viel enger, als bei einer gleich dicken Bergkrystallplatte.

Wenn man 2 Quarzplatten oder 2 Gypsplatten von gleicher Dicke, welche im homogenen Lichte die hyperbolischen Curven zeigen, gekreuzt zwischen die Turmaline bringt, so sieht man schon im weißen Tageslicht hyperbolische Curven. Sie erscheinen jetzt natürlich farbig.

§. 289. **Erscheinungen, wenn die Oberfläche der Krystallplatte einen Winkel von 45° mit der optischen Axe macht; Savart's Polaroscop.** Eine Quarzplatte, deren Oberfläche einen Winkel von 45° mit der optischen Axe macht, zeigt bei Anwendung von homogenem Lichte zwischen der Turmalinzange fast ganz grade abwechselnd helle und dunkle Streifen. Dieselben Streifen, aber sehr fein, sieht man in einem möglichst dünnen von einem Rhomboëder abgespaltenen Kalkspathblättchen. Diese Streifen sind gewissermaßen nur die gradlinige Fortsetzung der hyperbolischen Curven, welche man in Platten sieht, welche parallel mit der Axe geschliffen sind. Zwei gleich dicke Quarzplatten, welche in einem Winkel von 45° gegen die optische Axe geschliffen sind, zeigen bei dem weißen Tageslichte, wenn sie gekreuzt sind, im Turmalinapparate ebenfalls farbige Streifen, welche von dem mittleren an, welcher schwarz erscheint, nach beiden Seiten hin in der Ordnung der Newton'schen Scala auf einander folgen.

Savart hat einen Apparat construirt, der aus 2 solchen gekreuzten Quarzplatten, welche mit einer Turmalinplatte vereinigt sind, besteht. Wenn man durch die Turmalinplatte und die beiden Quarzplatten nach irgend einer Stelle hinsieht, von welcher polarisirtes Licht kommt, so werden alsbald die Farbenstreifen sichtbar werden, und zwar um so brillanter, je vollständiger die einfallenden Strahlen polarisirt sind. Sieht man durch diesen Apparat nach dem heiteren Himmel, nach einem Schieferdache, nach der

Digitized by Google

Wand eines Hauses, so wird man Streifen bald mehr, bald weniger deutlich erscheinen sehen, kurz, man kann mit diesem Apparate die geringsten Spuren von Polarisation der einfallenden Strahlen erkennen, weßhalb derselbe auch den Namen Polaroscop führt.

§. 290. **Erscheinungen in geglühten oder gepreßten Gläsern.** Schon in §. 273 ist gezeigt, daß man auch nicht doppeltbrechende Körper zu doppeltbrechenden machen könne, wenn man durch äußere Ursachen in einigen Richtungen die gegenseitige Anordnung der Theilchen, und dadurch die Elasticität des Aethers in diesen Richtungen verändert. Nur doppeltbrechende Körper zeigen im polarisirten Lichte Farbenerscheinungen; wenn daher auch andere Körper unter gewissen Umständen solche Farbenerscheinungen beobachten lassen, so läßt sich daraus schließen, daß sie unter diesen Umständen doppeltbrechend seien. So sieht man, wenn man geglühte und schnell abgekühlte Glasplatten von beliebiger Form in den Polarisationsapparat bringt, mannigfaltige, bald mehr, bald weniger regelmäßige, oft sehr schöne Farbenerscheinungen. Ferner wenn man eine cylindrische Messinghülse bis zu 100° oder 150° erwärmt, und dann einen Glascylinder hineinsteckt, so werden die äußersten Theilchen erwärmt, während die inneren noch kalt sind, es entsteht dadurch ein Spannungszustand, welcher sich ebenfalls durch Farbenerscheinungen im polarisirten Lichte kund gibt. Wenn man Streifen von dickem Glase in einer geeigneten Presse biegt, so zeigen sich an einem solchen Glasstücke während dieses gespannten Zustandes im Polarisationsapparate farbige Streifen. Ebenso zeigt eine quadratische Platte von dickem Spiegelglase, wenn man sie in einer Presse zusammendrückt, im Polarisationsapparate in der Richtung der Compression eine Farbenerscheinung.

Zehntes Kapitel.

Circularpolarisation.

§. 291. **Erscheinungen senkrecht zur optischen Axe geschliffener Bergkrystallplatten im Polarisationsapparate.** Bringt man eine solche Platte in den Polarisationsapparat, so erscheint ihr Bild lebhaft gefärbt, und zwar ändert sich die Farbe, wenn der obere Spiegel gedreht wird. In keiner Stellung des Zerlegungsspiegels erscheint die Krystallplatte ganz farblos hell oder dunkel. Die Farbenveränderungen, welche man beobachtet, wenn der obere Spiegel gedreht wird, folgen in der Ordnung der prismatischen Farben auf einander. Man hat Bergkrystallplatten, bei welchen man den Spiegel nach der rechten Seite hin, also in der Richtung von 0° nach 90° drehen muß, damit Roth in Gelb, Gelb in Grün, Grün in Blau, und Blau in Violett übergeht. Bei anderen Bergkrystallen aber muß man den Spiegel in der entgegengesetzten Richtung drehen, damit die Farben in derselben Ordnung auf einander folgen. Man unterscheidet deßhalb rechts- und links drehende Bergkrystallplatten.

Sieht man durch ein rothes Glas nach dem Zerlegungsspiegel, so wird man für 2 diametral gegenüberliegende Punkte des Theilkreises das Gesichtsfeld ganz dunkel sehen, an 2 anderen, um 90° von diesen entfernten Punkten aber ein Maximum von rothem Lichte. Die Punkte dieser Maxima

Digitized by Google

und Minima sind aber nicht, wie es der Fall ist, wenn keine Krystallplatte im Apparate sich befindet, 0°, 90°, 180° und 270°, sondern andere, deren Lage von der Dicke der angewandten Platte abhängt. Die eingelegte Platte sei z. B. rechtsdrehend, und ein Millimeter dick, so findet man die Maxima bei 19° und 199°, die Minima bei 109° und 289°. Für alle anderen Farben des Spectrums ist die Drehung der Polarisationsebene nach der rechten Seite hin durch diese Platte noch größer, und zwar wächst diese Drehung, je weiter die Farbe in der Reihe der prismatischen Farben von Roth absteht. Bei unserer Platte ist sie für Roth 19°, Orange 21°, Gelb 23°, Grün 28°, Blau 32°, Indigo 36°, Violett 41°. Die hier angegebenen Zahlen beziehen sich nur auf eine Quarzplatte von der angegebenen Dicke. Die Drehung wächst aber auch für dieselbe Farbe in demselben Verhältniß, wie die Dicke der Platte, so daß man z. B. für eine 2 Millimeter dicke Platte alle obigen Zahlen verdoppeln müßte.

Es geht also daraus hervor, daß, wenn sich im Polarisationsapparate die Bergkrystallplatte befindet, der Zerlegungsspiegel, in welcher Stellung er sich auch befinden mag, nicht alle prismatischen Farben in gleichem Verhältniß reflectirt, daß also, wenn eine Farbe auch vollständig reflectirt wird, andere weniger vollständig oder gar nicht reflectirt werden. Wenn man also das Bild der Quarzplatte im Zerlegungsspiegel ohne Anwendung eines farbigen Glases betrachtet, so begreift man jetzt leicht, daß es in allen Lagen des oberen Spiegels gefärbt erscheinen muß, und zwar können die Farben, welche sich im weißen Lichte zeigen, keine rein prismatischen, sondern nur Mischfarben sein, deren Nüance davon abhängt, welche der prismatischen Farben für irgend eine Stellung des Zerlegungsspiegels mit größerer oder geringerer Intensität erscheinen. Ganz dunkel kann das Gesichtsfeld nicht mehr werden, denn wenn auch eine Farbe im Minimo ihrer Intensität ist, so sind es doch die anderen nicht. Ebenso wenig erscheint die Platte an irgend einer Stelle ganz farblos und hell. Wenn man ähnlich, wie in §. 258 für eine Platte von bestimmter Dicke die Intensitätscurven der verschiedenen Farben des Spectrums mit Hilfe der obigen Zahlen vertical über einander construirt, so läßt sich schon im Voraus bestimmen, welche Farbenerscheinungen für alle möglichen Drehungsbögen an dieser Platte beobachtet werden.

§. 292. **Dieselben Erscheinungen durch Flüssigkeiten hervorgebracht.** Der Bergkrystall ist bis jetzt der einzige feste Körper, an welchem man die eben beschriebenen Erscheinungen beobachtet. Biot hat aber gezeigt, daß mehrere Flüssigkeiten sich in dieser Hinsicht ebenso verhalten, wie der Bergkrystall. Links drehende Flüssigkeiten sind z. B. Terpentinöl, Kirschlorbeerwasser, eine Lösung von arabischem Gummi; rechts drehende: Citronenöl, Zuckersyrup. Um indessen die Erscheinungen durch eine Flüssigkeit hervorzubringen, muß eine flüssige Säule von ziemlich bedeutender Höhe genommen werden. So zeigt z. B. eine Quarzplatte dieselben Farben, wie eine 68mal höhere Säule von Terpentinöl.

§. 293. **Warum zeigen ganz dünne und ganz dicke Bergkrystallplatten kaum Spuren von Färbung?** Gesetzt eine Quarzplatte sei ¼ Millimeter dick, so ist nach §. 281 der Drehungsbogen für rothe Strahlen ungefähr 5°, für violette Strahlen 10°. Die Drehungsbögen für alle anderen farbigen Strahlen fallen also zwischen 5° und 10°, die Maxima

Digitized by Google

aller Strahlen liegen also sehr nahe beisammen, und wenn die rothen Strahlen im Maximo ihrer Intensität sind, sind alle anderen demselben so nahe, daß das Roth nicht merklich vorherrschen kann, die Platte wird also fast ganz weiß erscheinen. Ebenso liegen alle Minima sehr nahe beisammen, nämlich zwischen 95° und 100°, hier also wird das Gesichtsfeld ganz dunkel sein. Es ist klar, daß, je dünner die Platte wird, die Erscheinung sich immer mehr derjenigen nähert, welche man ohne die zwischengelegte Platte beobachtet.

Auch sehr dicke Platten erscheinen farblos, jedoch ist die an ihnen beobachtete Erscheinung wesentlich von derjenigen sehr dünner Platten verschieden. Denn bei ihnen beobachtet man durchaus keine Veränderung in der Intensität des Lichtes, wenn der obere Spiegel gedreht wird; in allen Stellungen dieses Spiegels erscheint die Platte stets gleich hell. Mit zunehmender Dicke der Platte wächst nach §. 291 der Drehungsbogen für jede Farbe, mithin auch die Differenz der Drehungsbögen je zweier Farben. Mit zunehmender Dicke kann demnach die Differenz zwischen den Drehungsbögen der äußersten rothen und der äußersten violetten Strahlen bis auf 180° wachsen. Dann fallen aber die Maxima und Minima beider Farben vollkommen zusammen, und der Einfluß, welchen die rothen und die violetten Strahlen auf die Färbung ausüben, nimmt in gleichem Maße ab und zu, wenn man den oberen Spiegel dreht. Der Drehungsbogen derjenigen Strahlen, welche ungefähr an der Grenze zwischen Blau und Grün liegen, ist das Mittel zwischen den Drehungsbögen der rothen und violetten Strahlen. Lassen wir demnach die Quarzplatte noch einmal so dick werden, so ist die Differenz der Drehungsbögen der rothen und der blaugrünen Strahlen 180°, ebenso groß ist aber auch die Differenz der Drehungsbögen der blaugrünen und der violetten Strahlen. An einer solchen Platte erscheint also Roth, Blaugrün und Violett gleichzeitig im Maximo, keine dieser drei Farben kann also entschieden vorherrschen. Nehmen wir nun eine Platte, welche wieder noch einmal so dick ist, so ist die Differenz der Drehungsbögen der äußersten rothen und der mittleren gelben Strahlen 180°; ebenso groß ist für diese Platte die Differenz der gelben und blaugrünen Strahlen, der blaugrünen und indigofarbigen, der indigofarbigen und violetten. Roth, Gelb, Blaugrün, Indigo und Violett wirken also bei dieser Platte ganz gleichmäßig zur Färbung mit. Wenn diese Farben im Maximo sind, so geben sie zusammen eine Farbe, welche nur wenig von Weiß unterschieden ist. Sind sie aber im Minimo, so herrschen Orange, Grün, Blau und die Strahlen zwischen Indigo und Violett vor, und auch diese geben zusammen fast Weiß. Schon bei dieser Platte, welche etwa 27 Millimeter dick ist, kann man also kaum eine Veränderung der Färbung wahrnehmen, wenn man den oberen Spiegel dreht, und begreiflicher Weise nähert sich die Farbe der Platte noch mehr dem reinen, farblosen Weiß, wenn die Dicke noch mehr zunimmt.

§. 294. **Erklärung der Erscheinungen nach der Vibrationstheorie.** Wenn ein Glimmerblättchen grade so dick ist, daß für gelbes Licht der eine Strahl dem anderen um $\frac{1}{4}$ Wellenlänge vorauseilt, so wird dasselbe sehr nahe noch für alle anderen Farben der Fall sein. Ein solches Blättchen also wird bei gekreuzten Spiegeln graulich-weiß erscheinen, weil alle Farben fast gleich viel zu seiner Färbung beitragen. Wenn nun das Blättchen

Digitized by Google

so in den Apparat gelegt ist, daß die Schwingungsebenen der beiden Strahlen im Blättchen einen Winkel von 45° mit den Schwingungsebenen der beiden Spiegel machen, daß also das Blättchen so hell als möglich erscheint, so kann man den oberen Spiegel drehen, wie man will, ohne daß sich die Helligkeit des Blättchens merklich ändert. Durch das Zusammenwirken der beiden aus dem Glimmerblättchen austretenden Strahlen, welche rechtwinklig zu einander polarisirt sind, und von welchen der eine dem anderen um ¼ Wellenlänge vorausgeeilt ist, entsteht also ein Strahl, welcher sich wie ein gewöhnlicher Lichtstrahl zu verhalten scheint, da er von dem oberen Spiegel in allen Lagen gleich gut reflectirt wird. Dieser Strahl besitzt jedoch Eigenschaften, welche ihn wesentlich von einem gewöhnlichen Strahl unterscheiden. Aus Gründen, welche sogleich entwickelt werden sollen, nennt man ihn einen circular-polarisirten Strahl.

Fig. 87.

AB (Fig. 87) sei die Vibrationsebene des unteren Spiegels, CD und EF die Schwingungsebenen der beiden Strahlen im Glimmerblättchen, $\sphericalangle$ CoA = $\sphericalangle$ AoF = 45°. Für diesen Fall ist die Vibrationsintensität der nach CD und EF schwingenden Strahlen gleich groß (§. 260). Wenn nun die beiden Strahlen das Glimmerblättchen mit gleicher Geschwindigkeit durchlaufen hätten, so würden sie nach ihrem Austritt aus demselben irgend ein Aethertheilchen gleichzeitig und mit gleicher Kraft von o nach C und von o nach F treiben, das Aethertheilchen würde sich also in der Richtung von o nach A bewegen müssen, kurz, durch das Zusammenwirken der beiden Strahlen würde ein Strahl erzeugt werden, dessen Schwingungen in der Ebene AB vor sich gehen. Dasselbe würde natürlich stattfinden müssen, wenn der eine Strahl dem anderen um 1, 2, 3 u. s. w. Wellenlängen vorausgeeilt wäre. Nun ist aber der eine Strahl dem anderen nur um ¼ Wellenlänge vorausgeeilt. In einem Moment also, in welchem die Geschwindigkeit, welche der Strahl einem Aethertheilchen mittheilt, grade Null ist, ist es durch den anderen Strahl mit einem Maximum der Geschwindigkeit afficirt. Während aber die Geschwindigkeit, welche der eine Strahl dem Theilchen mittheilt, grade zunimmt, nimmt die Geschwindigkeit, mit welcher es durch den anderen Strahl angetrieben wird, in demselben Verhältnisse ab. Gesetzt der nach EF schwingende Strahl sei der vorangeeilte, das Aethertheilchen, dessen Gleichgewichtslage o ist, befände sich durch die Einwirkung dieses Strahles grade im Maximo der Ausweichung, in 1, so ist die Geschwindigkeit, mit welcher das Theilchen grade in diesem Augenblicke durch den in der Richtung EF schwingenden Strahl afficirt wird, gleich Null. In demselben Moment wird aber das in 1 befindliche Theilchen durch den anderen Strahl, welcher um ¼ Wellenlänge zurückgeblieben ist, mit einem Maximo der Geschwindigkeit parallel CD in der Richtung des Pfeils rs fortgetrieben. Diese Geschwindigkeit nimmt aber allmählig ab, und wird nach ¼ Undulation gleich Null, während die Geschwindigkeit, welche der andere Strahl dem Aethertheilchen mittheilt, in derselben Zeit von Null an wächst, und zwar in demselben Verhältniß. Das Aethertheilchen wird also einen Kreis-

Digitized by Google

bogen beschreiben, und nach ¼ Undulation in m ankommen. Hier ist nun die Geschwindigkeit in der Richtung CD gleich Null, und das Theilchen bewegt sich in der Richtung des Pfeils tu. Die Geschwindigkeit in dieser Richtung nimmt aber wieder ab, während sie in der Richtung des Pfeiles vw zunimmt, kurz, das Aethertheilchen beschreibt, von der Rechten zur Linken sich drehend, einen Kreis um seine Gleichgewichtslage. Wäre der parallel CD schwingende Strahl dem anderen um ¼ Wellenlänge vorangeeilt, so würde natürlich die Rotation der Aethertheilchen von der Linken zur Rechten stattfinden. Durch das Zusammenwirken der beiden mit gleicher Vibrationsintensität aus dem Glimmerblättchen austretenden Strahlen, welche rechtwinklig zu einander polarisirt sind, und von welchen der eine dem anderen um ¼ Wellenlänge vorangeeilt ist, entsteht also ein Strahl, welcher durch kreisförmige Vibrationen fortgepflanzt wird. Wenn sich aber die Rotation in der Richtung des Strahls von einem Aethertheilchen zum anderen fortpflanzt, so ist klar, daß nicht alle um ihre Gleichgewichtslage rotirenden Theilchen gleichzeitig dieselbe Stellung in ihrem Kreise einnehmen können. Die Aethertheilchen, welche in ihrer Gleichgewichtslage auf einer mit der Richtung des Strahles zusammenfallenden graden Linie liegen, bilden nun eine enge, um diese grade Linie herumgewundene Schraubenlinie, bei welcher die Höhe eines Ganges der Wellenlänge entspricht. Denkt man sich nun, daß sich eine solche Schraubenlinie mit gleichförmiger Bewegung um ihre Are umdreht, daß jede Umdrehung in derselben Zeit vollendet wird, welche auch zu einer gewöhnlichen Lichtvibration erfordert wird, so hat man eine richtige Vorstellung von der Bewegung und gegenseitigen Lage der Aethertheilchen eines circular-polarisirten Strahles.

§. 295. **Fortsetzung.** Bringt man nun ein Glimmerblättchen so in den Polarisationsapparat, daß es circular-polarisirtes Licht liefert, und legt man alsdann ein Gypsblättchen, welches für sich allein im Polarisationsapparate schon farbig erscheint, so auf das Glimmerblättchen, daß die eine der Schwingungsebenen im Gypsblättchen mit der Polarisationsebene der von dem unteren Spiegel kommenden Strahlen zusammenfällt, so wird man bei gekreuzten Spiegeln gar keine Färbung des Gypsblättchens wahrnehmen, sondern es wird dunkel erscheinen. Denn die zwei aus dem Glimmerblättchen austretenden Strahlen, welche durch ihr Zusammenwirken einen circular-polarisirten Strahl liefern würden, werden in dem Gypsblättchen jeder in zwei rechtwinklig zu einander linear-polarisirte Strahlen zerlegt, von welchen aber zwei, weil ihre Schwingungen rechtwinklig zur Schwingungsebene des oberen Spiegels sind, sich nicht wirksam erweisen. Sobald man aber ein zweites Glimmerblättchen von derselben Dicke, wie das untere, so auf das Gypsblättchen legt, daß die Schwingungsebenen des oberen Glimmerblättchens mit denen des unteren zusammenfallen, so erscheint sogleich das Gypsblättchen gefärbt, und diese Färbung ändert sich, wenn man den oberen Spiegel des Apparats dreht, ganz in derselben Weise, als ob man eine senkrecht zur Are geschliffene Quarzplatte in dem Apparat hätte.

Digitized by Google

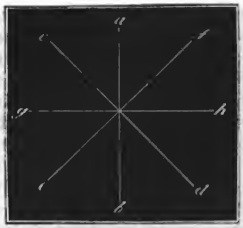


Fig. 88.

ab (Fig. 88) sei die Schwingungsebene der von dem unteren Spiegel kommenden Strahlen, cd und ef die Schwingungsebenen der beiden Strahlen im Glimmerblättchen, ab und gh die beiden Schwingungsebenen im Gypsblättchen. Der Strahl, welcher im Glimmerblättchen parallel cd schwingt, wird bei seinem Eintritt in das Gypsblättchen in zwei Strahlen zerlegt, welche nach den Richtungen ab und gh schwingen. Eine ähnliche Zerlegung erleidet aber auch der im Glimmerblättchen parallel ef schwingende Strahl, und so kommt es, daß sich im Gypsblättchen zwei Strahlen fortpflanzen, deren Schwingungen parallel ab, und zwei andere, deren Schwingungen parallel gh sind. Die beiden parallel ab schwingenden Strahlen haben gleiche Vibrationsintensität (die Ebenen cd und ef sind zu den Ebenen ab und gh unter einem Winkel von 45° geneigt), der eine ist aber dem andern beim Eintritt in das Gypsblättchen um ¼ Wellenlänge vorausgeeilt. Da die beiden Strahlen nach derselben Richtung schwingen, so werden sie interferiren, und durch ihr Zusammenwirken einen einzigen Strahl hervorbringen. Auch die beiden Strahlen, welche im Gypsblättchen parallel gh schwingen, haben gleiche Vibrationsintensität, und der eine ist dem anderen beim Eintritt in das Gypsblättchen ebenfalls um ¼ Wellenlänge vorausgeeilt; also auch diese combiniren sich zu einem einzigen Strahle, dessen Vibrationsintensität grade so groß ist, wie die des Strahls, welcher parallel ab schwingt. Es treten also aus dem Gypsblättchen zwei rechtwinklig zu einander polarisirte Strahlen von gleicher Intensität aus, von welchen der eine dem anderen je nach der Dicke des Gypsblättchens um eine bestimmte Anzahl von Wellenlängen vorausgeeilt ist. Beim Eintritt in das obere Glimmerblättchen wird jeder derselben wieder in zwei rechtwinklig zu einander polarisirte, in den Ebenen cd und ef schwingende Strahlen zerlegt. Von den zwei nach cd und ef schwingenden Strahlen, welche aus dem Strahle entstanden sind, der im Gypsblättchen nach ab schwang, eile im Glimmerblättchen der nach ef schwingende dem nach cd schwingenden um ¼ Wellenlänge voraus, so geben sie beide nach §. 294 einen circular-polarisirten Strahl, dessen Aethertheilchen von der Rechten nach der Linken rotiren müssen, während in dem angenommenen Falle der Strahl, welcher parallel gh schwingend das Gypsblättchen verlassen hat, durch das obere Glimmerblättchen in einen circularpolarisirten Strahl von entgegengesetzter Rotationsrichtung verwandelt wird, wie sich ebenso nach §. 294 zeigen läßt. Aus dem Glimmerblättchen treten also zwei circular-polarisirte Strahlen von gleicher Intensität, aber entgegengesetzter Rotationsrichtung aus.

§. 296. **Fortsetzung.** Durch die Interferenz der beiden circular-polarisirten Strahlen, welche aus dem Glimmerblättchen austreten, wird nun wieder linear-polarisirtes Licht erzeugt, dessen Schwingungsrichtung davon abhängt, wie viel Wellenlängen der eine Strahl im Gypsblättchen dem anderen vorausgeeilt ist, wie aus dem Folgenden erhellen wird.

Digitized by Google

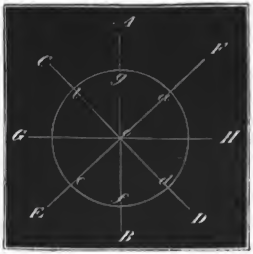


Fig. 89.

Nehmen wir zunächst an, daß in einem bestimmten Momente ein Aethertheilchen unter dem Einflusse des links rotirenden Strahles sich in a (Fig. 89) befände, so würde das Aethertheilchen in diesem Augenblicke offenbar durch 2 einander gleiche, aber entgegengesetzte Kräfte angegriffen werden. Der eine Strahl für sich allein würde das Theilchen nach b, der andere nach d führen, beide zusammen führen es also von a nach o, alsdann weiter von o nach c. In c ist das Theilchen wieder zwei grade entgegengesetzten Kräften ausgesetzt, beginnt deßhalb sich nach o und von da nach a zu bewegen. Es oscillirt also zwischen a und c. Nun aber sei der links rotirende Strahl dem anderen um ¼ Wellenlänge mehr vorausgeeilt, als eben angenommen war, dann wird sich dasselbe Aethertheilchen, welches sich in einem bestimmten Momente unter dem Einflusse des langsameren Strahles grade in a befindet, unter dem alleinigen Einfluß des anderen Strahles nicht gleichzeitig an derselben Stelle sein können, sondern es wird sich in b befinden. In gleicher Zeit wird aber das Aethertheilchen durch den einen Strahl von a nach f, durch den anderen von b nach f geführt werden. In f also muß sich das Aethertheilchen gleichzeitig unter dem Einfluß der beiden entgegengesetzt rotirenden Strahlen befinden. Hier ist es also für einen Moment der Einwirkung von zwei gleichen, aber entgegengesetzten Kräften ausgesetzt, und deßhalb wird es zwischen f und g oscilliren müssen. Der links rotirende Strahl sei endlich dem anderen um ½ Wellenlänge mehr vorausgeeilt, als bei der ersten Annahme, so läßt sich ebenso zeigen, daß CD die Vibrationsebene des linear-polarisirten Strahles sein muß, welcher aus der Interferenz der beiden circular-polarisirten hervorgeht. Kurz, so oft der links rotirende Strahl dem anderen um ¼ Wellenlänge mehr vorauseilt, wird auch die Polarisationsebene des resultirenden Strahles um 45° mehr nach der Linken gedreht.

Daß durch die Interferenz der beiden Strahlen überhaupt eine Färbung hervorgerufen wird, bedarf nach dem Früheren keiner weiteren Erklärung. Da nun aber für die stärker brechbaren Strahlen des Spectrums bei gleicher Dicke einer Krystallplatte der Gangunterschied der beiden Strahlen bedeutender ist, als für die weniger brechbaren, so wird man in unserem angenommenen Falle den Zerlegungsspiegel des Apparates von der Rechten zur Linken drehen müssen, um zu bewirken, daß die rothe Färbung durch Gelb und Grün in Blau übergeht. Wäre dagegen der rechts rotirende Strahl dem anderen vorausgeeilt, so würde die Polarisationsebene der stärker brechbaren Strahlen mehr nach der Rechten hin gedreht worden sein, man müßte also den Zerlegungsspiegel von der Linken zur Rechten drehen, um zu bewirken, daß die Färbung von Roth in Gelb, Grün, Blau übergeht.

Die Erscheinungen, welche man im Polarisationsapparate an Quarzplatten beobachtet, welche senkrecht zur Are geschliffen sind, lassen sich demnach durch die Annahme erklären, daß sich in diesem Mineral in der Richtung der krystallographischen Are zwei circular-polarisirte Strahlen von

Digitized by Google

entgegengesetzter Rotationsrichtung fortpflanzen, durch deren Interferenz jene Erscheinungen hervorgebracht werden. Der Krystall ist rechts oder links drehend, je nachdem der rechts oder der links rotirende Strahl den Krystall mit größerer Geschwindigkeit durchläuft.

§. 297. **Drehung der Polarisationsebene durch Einwirkung des Magnetismus.** Man nehme den gewöhnlichen Apparat für die Circularpolarisation von Flüssigkeiten, fülle die 6 bis 8 Zoll lange Röhre mit einer Zuckerlösung, bereitet aus einem Gewichtstheil Candiszucker und 2 Gewichtstheilen Wasser (eben so gut kann auch eine der anderen in §. 292 erwähnten Flüssigkeiten dazu benutzt werden), umgebe die Röhre mit einer electromagnetischen Spirale, welche über einen dünnen Eisenblechcylinder gewickelt ist, vor das hintere Nicol'sche Prisma stelle man eine brennende Argand'sche Lampe. Die Strahlen werden durch ihren Durchgang durch das hintere Nicol'sche Prisma polarisirt, und dann durch den Durchgang durch die Flüssigkeitssäule circular-polarisirt. Bei Anwendung von homogenem Lichte suche man die Stellung des vorderen Prisma, bei welcher das Gesichtsfeld dunkel erscheint. Ist diese gefunden, dann verbinde man die beiden Enden der Spirale mit den Polen einer galvanischen Batterie, und zwar so, daß der Südpol des Electromagnets an dem hinteren, der Nordpol an dem vorderen Prisma liegt. Man wird das Gesichtsfeld jetzt nicht mehr dunkel, sondern röthlich gefärbt erblicken. Um es wieder dunkel zu erhalten, muß das vordere Prisma etwas nach Links gedreht werden. Gibt man aber dem Strome die umgekehrte Richtung, so daß auch die Pole des Electromagnets eine entgegengesetzte Lage erhalten, dann erscheint das Gesichtsfeld statt dunkel bläulichgrün, und man muß das vordere Prisma etwas nach Rechts drehen, wenn das Gesichtsfeld wieder dunkel gesehen werden soll. Aus diesem Versuche geht hervor, daß die Polarisationsebene eines durch die Are einer hohlen electromagnetischen Spirale hindurch geleiteten oder nahe bei dieser Are vorbeigehenden Lichtstrahles durch den Einfluß des Electromagnets zum Drehen gebracht, und je nach der Richtung des electrischen Stromes bald rechts, bald links gedreht werden könne. Es ist dies eine der wichtigen neuen physikalischen Entdeckungen Faraday's, und wurde von ihm im Jahre 1845 veröffentlicht. Der obige Versuch jedoch wurde zuerst von Böttger angegeben, noch ehe Faraday das Verfahren, durch welches er zu seiner Entdeckung gelangt war, beschrieben hatte.

§. 298. **Farbenringe senkrecht zur Are geschliffener Quarzplatten.** Bei den bisher beschriebenen Farbenerscheinungen senkrecht zur Are geschliffener Quarzplatten kamen nur solche Strahlen in Betracht, welche die Platte in der Richtung der optischen Are durchlaufen hatten (§. 285). Wenn man aber eine solche Platte in der Turmalinzange dicht vor das Auge bringt, so daß auch solche Strahlen in dasselbe gelangen, welche die Platte in schräger Richtung durchlaufen haben, so sieht man, wenn die Turmaline gekreuzt sind, ein Ringsystem, welches demjenigen anderer einaxiger Krystalle ganz ähnlich ist, aber das schwarze Kreuz ist in der Mitte der Figur ganz verschwunden, und nur weiter von dem Mittelpunkte entfernt sind noch schwache Spuren desselben wahrzunehmen. In der Mitte der Figur erscheint dagegen ein farbiger, kreisförmiger Fleck, dessen Färbung von der Dicke der Platte abhängt. Es ist dies die Farbe, welche die

Digitized by Google

Quarzplatte zwischen den gekreuzten Spiegeln des Polarisationsapparates zeigt, denn dort sieht man ja nur den centralen Theil der Figur.

Legt man aber 2 senkrecht zur Axe geschliffene Quarzplatten von vollkommen gleicher Dicke auf einander, von welchen die eine rechts, die andere links drehend ist, so zeigen diese zusammen zwischen den gekreuzten Turmalinplatten ein ganz eigenthümliches Ringsystem, welches eine Combination von kreisrunden Ringen mit 4 von der Mitte ausgehenden Spiralen ist.

Sechster Abschnitt.

Von der Wärme.

§. 299. **Was versteht man unter Wärme?** Ein und derselbe Körper kann zu verschiedenen Zeiten durch Berührung oder auch nur durch seine Nähe in uns eine verschiedene Empfindung hervorrufen, so z. B. ein Stück Holz, wenn es im Sommer eine Zeit lang den Sonnenstrahlen ausgesetzt war, und wenn es an einem Wintertage an der freien Luft gelegen hatte. Die Empfindung, welche es im ersten Falle erzeugt, nennen wir Wärme, diejenige aber, welche wir im zweiten Falle haben, Kälte. Wenn schon diese Empfindungen allgemein bekannt sind, so lassen sie sich doch eben so wenig, wie alle anderen Empfindungen, näher beschreiben (§. 129). Beide Empfindungen sind nicht ihrem Wesen nach entgegengesetzt, sondern nur ihrer Stärke nach verschieden, was schon daraus hervorgeht, daß der Eine die Empfindung, welche ein Körper in ihm erzeugt, als Wärme, ein Anderer aber die Empfindung, welche ganz derselbe Körper zu derselben Zeit in ihm hervorruft, als Kälte bezeichnet, wie z. B. die Luft in einem mäßig geheizten Zimmer, in welches der Eine aus einem stark geheizten, der Andere aber aus der freien Luft tritt. Auch ist der Uebergang aus der einen in die andere Empfindung ein so allmähliger, daß man gar nicht sagen kann, wo die eine aufhört, und die andere anfängt.

Man bedient sich aber auch desselben Wortes Wärme, um den Zustand der Körper zu bezeichnen, in welchem sie bei der Berührung oder durch ihre Nähe in uns die erwähnte Empfindung erregen. Sowie die Empfindung der Wärme Abstufungen zuläßt, so muß dies auch mit dem Wärmezustand der Fall sein. Man bedient sich des Wortes Temperatur, um die verschiedenen Grade des Wärmezustandes zu bezeichnen, und sagt, ein Körper habe eine höhere oder niedrigere Temperatur, je nachdem er uns wärmer oder kälter erscheint. Ja man gebraucht das Wort Wärme noch in einem dritten Sinne, um nämlich die Ursache zu bezeichnen, durch welche die Körper in den Zustand versetzt werden, daß sie die Empfindung der Wärme in uns erregen können. Wollen wir nun das Wesen der Wärme in diesem letzteren Sinne näher zu ergründen suchen, so wird es erforderlich, daß wir zunächst von allen denjenigen Erscheinungen reden, bei welchen sich die Wärme thätig zeigt, oder welche wir als Wirkungen derselben kennen, weßhalb auch in Folgendem hiermit der Anfang gemacht werden soll.

Digitized by Google

Erstes Kapitel.

Von der Ausdehnung durch die Wärme.

§. 300. **Körper aller Aggregatzustände werden durch die Wärme ausgedehnt.** 1) Eine Messingkugel, welche bei gewöhnlicher Temperatur durch einen Ring nur grade hindurchgeht, geht nicht mehr durch, sondern bleibt auf demselben liegen, wenn man dieselbe erhitzt. Wenn sie sich dann wieder bis auf ihre frühere Temperatur abkühlt, so fällt sie durch den Ring hindurch. 2) Man nehme eine etwas enge Glasröhre, an deren eines Ende eine Kugel angeblasen ist, fülle die Kugel und einen Theil der Röhre mit einer tropfbaren Flüssigkeit, etwa mit Wasser, und erwärme die Röhre, so sieht man die Flüssigkeit in der Röhre in die Höhe steigen. Beim Erkalten fällt sie dann nach und nach wieder bis auf ihre frühere Höhe zurück. 3) Nimmt man dieselbe Röhre, hält das offene Ende mit dem Finger zu, taucht es unter Wasser in einem anderen Gefäße, und zieht dann den Finger weg, so fällt das Wasser natürlich bis zu dem Ende der Röhre, und die an diesem Ende vorher befindliche Luft steigt in den oberen Theil der Kugel. Wird nun die Kugel durch die Hand oder auf andere Weise vorsichtig erwärmt, so wird nach und nach alles Wasser aus der Kugel und selbst aus der Röhre theilweise oder ganz hinausgedrückt. Wird mit der Erwärmung nachgelassen, so fängt das Wasser allmählig wieder an zu steigen. Eine schlaffe, luftdicht zugebundene Thierblase, auf den warmen Ofen gelegt, schwillt auf; fällt aber wieder zusammen, nachdem man sie von dem Ofen entfernt hat.

Die hier angeführten Erscheinungen zeigen, daß Körper in allen 3 Aggregatzuständen bei zunehmender Wärme ihr Volumen vergrößern, bei abnehmender aber vermindern; denn daß in dem dritten Versuch die ausdehnsam flüssige Luft es ist, welche durch ihre Ausdehnung das Wasser in der Röhre hinabdrückt, oder die Wände der Blase aus einander treibt, braucht wohl nicht erst erwähnt zu werden. Aber nicht bloß die hier erwähnten Körper sind es, auf welche die Wärme ausdehnend wirkt, sondern es sind alle Körper ohne Ausnahme dieser Wirkung unterworfen. Einige Erfahrungen, welche dieser Behauptung zu widersprechen scheinen, wie z. B. daß thönerne Gefäße, Backsteine, Ziegeln, beim Brennen schwinden, daß Kirschen, Mirabellen, Zwetschen beim Dörren zusammenschrumpfen, daß an neuen Thüren im Sommer die Füllungen sich aus den Fugen zurückziehen, daß an neuen Möbeln in der Wärme die Holzwände öfter Risse bekommen, u. a., bilden nur scheinbare Ausnahmen. In allen diesen und ähnlichen Fällen sind es nämlich die zwischen den Theilchen dieser Körper enthaltenen Flüssigkeiten, welche durch die Wärme ausgetrieben werden, und dadurch diesen Theilchen gestatten, sich näher an einander zu lagern. Sobald diese Körper vollkommen trocken geworden sind, d. h. sobald alle Feuchtigkeit ausgetrieben ist, sehen wir sie ebenso, wie alle übrigen Körper, bei zunehmender Wärme ihr Volumen vergrößern. Die Wärme zeigt sich also als eine der Cohäsion entgegenwirkende Kraft. Ihre ausdehnende Einwirkung auf einen Körper muß demnach unter sonst gleichen Umständen um so größer sein, je kleiner die Cohäsion seiner Theilchen ist. Auch dieser Satz

Digitized by Google

wird durch die Erfahrung bestätigt, welche lehrt, daß bei gleicher Wärme luftförmige Körper sich stärker ausdehnen, als tropfbar flüssige, und diese stärker, als feste Körper. Da aber ferner selbst bei Körpern desselben Aggregatzustandes die Cohäsion verschieden ist, so muß sich demnach die Größe der durch die Wärme bewirkten Ausdehnung nicht nur nach dem Aggregatzustande, sondern auch nach der Substanz des Körpers richten, wenngleich noch nicht, wie vermuthet werden sollte, bewiesen werden kann, daß bei gleicher Wärme die Größe der Ausdehnung zweier verschiedener Körper sich umgekehrt verhalte, wie die Größe ihrer Cohäsion.

§. 301. **Thermometer.** Wie man überhaupt die Größe einer Kraft nur aus der Größe der durch sie hervorgebrachten Wirkung beurtheilen kann, und dadurch ein Mittel an die Hand bekommt, 2 verschiedene Kräfte ihrer Größe nach mit einander zu vergleichen, so auch bei der Wärme. Von den Wirkungen der Wärme haben wir bis jetzt zwei kennen gelernt, nämlich die Einwirkung der Wärme auf unser Gefühl, und die Ausdehnung der Körper durch dieselbe. Daß die erstere zu dem beabsichtigten Zwecke nicht geeignet ist, geht schon daraus hervor, daß die Stärke einer Empfindung nicht numerisch bestimmt werden kann. Aber auch noch der weitere Umstand ist hinderlich, daß die Stärke einer Empfindung nicht nur von dem Körper, welcher sie erregt, abhängt, sondern daß auch die verschiedenen subjectiven Zustände des Empfindenden einen wesentlichen Einfluß darauf haben, so daß eine durch dieselbe Ursache hervorgerufene Einwirkung auf das Gefühl von verschiedenen Personen, oder selbst von verschiedenen Theilen derselben Person ganz verschieden empfunden wird. Zur Bestätigung des eben Gesagten in Beziehung auf die Wärme nehme man 3 Gläser, fülle das eine mit Wasser von gewöhnlicher Temperatur, das zweite mit lauwarmem, und das dritte mit warmem Wasser, stecke eine Zeit lang einen Finger der einen Hand in das erste, und einen der anderen Hand in das dritte Glas, und bringe sie dann beide in das zweite Glas, so wird man an demjenigen Finger, welcher in dem warmen Wasser gewesen ist, ein Gefühl von Kälte, an dem andern aber ein Gefühl von Wärme haben, unerachtet doch beide Empfindungen durch dasselbe Wasser hervorgerufen werden. Anders dagegen verhält es sich mit der Ausdehnung eines Körpers. Diese kann genau gemessen und in Zahlen ausgedrückt werden. Da nun die Erfahrung gelehrt hatte, daß die Ausdehnung desto größer sei, je größer die Wärme ist, so lag der Gedanke nahe, aus der Größe der beobachteten Ausdehnung eines Körpers auf die Größe der Wärme zurückzuschließen. Instrumente nun, durch welche an der Ausdehnung eines Körpers eine wenngleich nur vergleichende Messung der Wärme bezweckt wird, nennt man Thermometer (θέρμη Wärme, μετρεῖν messen). Man hat solche Instrumente von ganz verschiedener Einrichtung und Construction, von allen aber ist das s. g. Queckſilberthermometer in den allgemeinsten Gebrauch gekommen. Unter der unendlichen Mannichfaltigkeit von Körpern eignet sich aber auch das Quecksilber zu dem beabsichtigten Zweck am besten. Man mußte eine tropfbare Flüssigkeit nehmen, weil die Ausdehnung fester Körper zu unbedeutend ist, als daß man geringe Veränderungen der Wärme an derselben wahrnehmen könnte, und weil auf der anderen Seite die Ausdehnung der luftförmigen Körper zu bedeutend ist, so daß Thermometer, bei welchen an der verschiedenen Aus-

Digitized by Google

dehnung eines luftförmigen Körpers die Veränderungen der Wärme gemessen werden sollten, eine unverhältnißmäßige Länge haben müßten. Unter allen tropfbaren Flüssigkeiten verdient aber wieder das Quecksilber den Vorzug, weil es in dem Zwischenraume verschiedener Temperaturen, die wir gewöhnlich beobachten, seinen Aggregatzustand unverändert beibehält, während andere Flüssigkeiten in demselben Zwischenraume theils luftförmig, theils fest werden, und weil es auch, wie die Erfahrung gelehrt hat, wenigstens in den angegebenen Grenzen bei gleicher Zunahme von Wärme sich stets um gleich Viel ausdehnt, während diese Gleichmäßigkeit der Ausdehnung den anderen tropfbaren Flüssigkeiten ebenfalls mehr oder weniger abgeht. Das Quecksilberthermometer besteht aus einer engen Glasröhre, an welche am einen Ende eine Kugel oder auch eine cylinderförmige Erweiterung angeblasen ist. Die Glasröhre muß überall gleich weit sein, so daß man überzeugt sein kann, daß zwischen je 2 gleich langen Stücken derselben sich immer eine gleiche Masse Quecksilber befindet. Vor der Anfertigung eines Thermometers muß jedesmal die anzuwendende Röhre auf diese Eigenschaft untersucht, sie muß calibrirt (calibrer, abgleichen) werden. Es geschieht dies, indem man eine kleine Quantität Quecksilber in die Röhre bringt, und genau mißt, welche Länge in der Röhre sie einnimmt, dann nach und nach das Quecksilber nach anderen Stellen der Röhre laufen läßt, und nachsieht, ob sie auch an allen anderen Stellen dieselbe Länge in der Röhre einnimmt. Hat man eine taugliche Röhre gefunden, so füllt man die Kugel und einen Theil der Röhre mit Quecksilber (man erwärmt die Kugel vorsichtig, um die Luft theilweise auszutreiben, und bringt dann die Oeffnung der Röhre unter Quecksilber, so wird das Quecksilber durch den überwiegenden äußeren Luftdruck hineingetrieben). Hierauf erwärmt man das Quecksilber in der Röhre, bis es zu dem offenen Ende steigt, wodurch die über dem Quecksilber stehende Luft ausgetrieben wird, und bläst dann das offene Ende zu. Um nun die Ausdehnung des Quecksilbers, und durch dieselbe die Größe der Wärme messen zu können, ist es nothwendig, den Stand des Quecksilbers in der Röhre bei wenigstens 2 bestimmten und bekannten Temperaturen zu finden. Zu diesem Zwecke bringt man die Röhre in schmelzendes Eis oder schmelzenden Schnee, so wird man, so oft man auch den Versuch wiederholt, finden, daß das Quecksilber sich stets bis zu demselben Punkte zusammenzieht. Diesen Punkt merkt man sich an, er heißt der Eispunkt oder Gefrierpunkt des Wassers. Dann hängt man die Röhre in die aufsteigenden Dämpfe von siedendem Wasser. Auch hier steigt das Quecksilber immer bis zu derselben Höhe, so lang wenigstens der Barometerstand sich gleich bleibt. Dieser Punkt wird ebenfalls angemerkt, und der Siedepunkt genannt. Um genau übereinstimmende Thermometer zu erhalten, wird der Siedepunkt entweder bei einem Barometerstand von 28 Par. Zoll bestimmt, oder es wird, da, wie weiter unten §. 310 gezeigt wird, der Einfluß des Luftdrucks auf das Sieden des Wassers bekannt ist, die nöthige Correction angebracht, wenn derselbe bei einem anderen Barometerstande gefunden sein sollte. Diese Correction beträgt ungefähr 1°, wenn der Barometerstand einen Zoll höher oder tiefer ist. Den Abstand des Gefrierpunktes von dem Siedepunkt nennt man den Fundamentalabstand. Diesen theilt man entweder in 80 (Reaumür) oder 100 (Celsius) oder 180 (Fahrenheit) gleiche Theile. Solche

Digitized by Google

Theile trägt man von dem Gefrierpunkt auch noch abwärts auf. Einen dieser Theile nennt man einen Grad; um zu bezeichnen, ob Grade über oder unter dem Gefrierpunkt gemeint sind, setzt man vor die Zahl + oder —, oder bedient sich der Namen Wärme- oder Kältegrade. Um ferner Thermometerangaben allgemein verständlich zu machen, muß auch jedesmal noch angegeben werden, ob der Fundamentalabstand des Thermometers, an welchem beobachtet wurde, in 80 oder 100 oder 180 Grade abgetheilt war. Es geschieht dies dadurch, daß man hinter die Zahl, welche die Grade bezeichnet ein R., ein C. oder ein F. setzt. Reaumür'sche Thermometer sind hauptsächlich in Deutschland, Celsius'sche, die auch Centesimalthermometer (centum hundert) genannt werden, in Frankreich, und Fahrenheit'sche in England in allgemeinem Gebrauch. Bei wissenschaftlichen Angaben bedient man sich in der neueren Zeit fast ausschließlich der Centesimalgrade, und solche sind auch in diesem Buche immer zu verstehen, wenn die Grade nicht ausdrücklich mit einem R. oder einem F. bezeichnet sind. Bei den Reaumür'schen und Celsius'schen Thermometern ist der Gefrierpunkt mit 0, und der Siedepunkt beziehlich mit 80 und 100 bezeichnet. Bei dem Fahrenheit'schen aber steht am Gefrierpunkt 32, und also am Siedepunkt 32 + 180 oder 212. Fahrenheit hatte nämlich Anfangs 2 andere feste Punkte, der eine war die in Danzig im Jahre 1709 beobachtete größte Kälte, und der andere die Blutwärme, den ersteren bezeichnete er mit 0, den letzteren mit 96. Auf künstlichem Wege wird der Nullpunkt der Fahrenheit'schen Scala gefunden, indem man die Thermometerröhre in ein Gemisch eintaucht, das aus 3 Theilen Schnee und einem Theile Kochsalz besteht.

Um die Angaben einer Thermometerscala auf diejenigen einer anderen zu reduciren, genügt es zu wissen, daß $1°$ R. $= \frac{5}{4}°$ C. $= \frac{9}{4}°$ F., $1°$ C. $= \frac{4}{5}°$ R. $= \frac{9}{5}°$ F., und $1°$ F. $= \frac{4}{9}°$ R. $= \frac{5}{9}°$ C. ist, und daß an dem Fahrenheit'schen Gefrierpunkt nicht 0, sondern 32 steht.

Außer Quecksilber wird als Flüssigkeit zur Füllung der Thermometerröhren auch wohl Weingeist angewandt. Es muß dies geschehen, wenn das Thermometer zur Messung sehr niedriger Temperaturen dienen soll. Man kennt nämlich noch keine Kälte, bei welcher der Weingeist gefröre, also seinen Aggregatzustand veränderte, während Quecksilber bei — 39° fest wird, und sich schon in der Nähe dieses Punktes in anderen Verhältnissen ausdehnt und zusammenzieht. Dagegen darf die Scala eines Weingeistthermometers nicht so angefertigt werden, daß man den Fundamentalabstand in gleiche Theile theilt, weil der Weingeist nicht die Gleichmäßigkeit der Ausdehnung besitzt, wie das Quecksilber; am besten bestimmt man die einzelnen Grade durch Vergleichung mit einem Quecksilberthermometer.

Auch bei ganz regelrecht angefertigten Thermometern findet man oft, wenn man sie nach längerem Gebrauche einer genauen Prüfung unterwirft, daß der Nullpunkt etwas zu hoch liegt. Es kommt dies offenbar daher, daß der Druck der atmosphärischen Luft auf das Glas der Kugel größer ist, als derjenige, welchen dasselbe von Innen durch das Quecksilber erleidet, wodurch die Kugel etwas zusammengedrückt, und ihr Volumen vermindert wird, so daß ein Theil des Quecksilbers noch in die Röhre getrieben wird. Wenn es daher auf große Genauigkeit ankommt, so läßt man die bis auf die Theilung fertigen Thermometer erst längere Zeit

Digitized by Google

liegen, ehe die Theilung vorgenommen wird. Zu einer richtigen Würdigung der Thermometer muß auch der Umstand noch erwähnt werden, daß in der Wärme sich nicht nur das Queckſilber, ſondern auch das Glas ausdehnt, doch iſt die Ausdehnung des letzteren in Vergleich zu derjenigen des Queckſilbers ſo unbedeutend, daß ſie füglich unberückſichtigt bleiben darf.

§. 302. **Fortſetzung; Maximum- und Minimumthermometer, Metallthermometer, Differentialthermometer, Pyrometer.** Zu manchen Zwecken, z. B. zu der Beſtimmung der mittleren Wärme eines Tages, iſt es wünſchenswerth, die innerhalb eines gewiſſen Zeitraumes, z. B. 24 Stunden, ſtattfindende höchſte und niedrigſte Temperatur zu kennen, ohne doch grade während des ganzen Zeitraumes das Thermometer fortdauernd beobachten zu müſſen. Inſtrumente, welche zu dieſem Zwecke conſtruirt ſind, nennt man Maximum- und Minimumthermometer, oder auch Thermometrographen (γράφειν ſchreiben; weil ſie die höchſten und niedrigſten Temperaturen ſelbſt anmerken). Der von Rutherford angegebene Thermometrograph iſt faſt in allgemeinem Gebrauch. An derſelben Faſſung befinden ſich 2 horizontal liegende, in ihrem Gange übereinſtimmende Thermometer, ein Queckſilber- und ein Weingeiſtthermometer. Vor der Queckſilberſäule liegt ein kleines Stahlſtäbchen, welches, wenn das Queckſilber ſich ausdehnt, alſo die Temperatur ſteigt, vorwärts geſchoben wird, aber, wenn beim Fallen der Temperatur das Queckſilber ſich wieder zuſammenzieht, liegen bleibt, weil Queckſilber und Stahl keine Adhäſion zu einander haben. In dem Weingeiſt iſt ein kleines Glasſtäbchen; zieht ſich der Weingeiſt zuſammen, ſo nimmt er, weil er zu Glas große Adhäſion hat, das Glasſtäbchen mit, dehnt er ſich aber aus, ſo bewegt er ſich an dem Glasſtäbchen vorbei, ohne es mitzubewegen. Die beiden Thermometer ſind nach entgegengeſetzter Richtung an der Faſſung befeſtigt, wodurch bewirkt wird, daß, wenn die Faſſung geneigt wird, ſowohl das Stahl-, als das Glasſtäbchen ſich bis zu dem Ende des Queckſilbers und des Weingeiſts in den Röhren bewegen. Dies muß jedesmal zu Anfang des Zeitraumes, auf welchen eine Beobachtung ausgedehnt werden ſoll, geſchehen, dann zeigt zu Ende deſſelben das Stahlſtäbchen, wieweit das Queckſilber geſtiegen war, oder die höchſte Temperatur, das Glasſtäbchen dagegen, wieweit der Weingeiſt gefallen war, oder die niedrigſte Temperatur des ganzen Zeitraumes.

Wenn gleich die feſten Körper, wie ſchon bemerkt, wegen ihrer geringen Ausdehnung nicht zu Thermometern geeignet ſind, ſo hat man doch von der Erfahrung, daß verſchiedene Metalle bei gleicher Wärme ſich ungleich ſtark ausdehnen, eine Anwendung zur Conſtruction eines Thermometers, des ſ. g. Metallthermometers, gemacht. Meſſing und Stahl dehnen ſich ungleich ſtark aus. In dem Metallthermometer ſind Streifen beider Metalle feſt auf einander gelöthet, dann die ſo verbundenen Streifen gekrümmt, und mit dem einen Ende feſt gemacht. Die Krümmung derſelben muß ſich bei jedem Wechſel der Temperatur verändern. Die dadurch hervorgehende Bewegung wird auf ein Hebelwerk, das mit dem freien Ende des Streifens in Berührung iſt, übergetragen. Das Hebelwerk ſetzt einen Zeiger in Bewegung, deſſen Are ſich in der Mitte eines eingetheilten Kreiſes befindet, ſo daß an dem Umfange des Kreiſes die Grade abgeleſen werden. Die Eintheilung geſchieht dadurch, daß man den Stand des Zei-

Digitized by Google

gers bei verschiedenen Temperaturen mit den Angaben eines Quecksilberthermometers vergleicht. Durch die angegebene Einrichtung wird das ganze Instrument seiner äußeren Gestalt nach einer Taschenuhr ähnlich. Noch viel empfindlicher, und, wenngleich auf demselben Principe beruhend, doch von verschiedener Construction ist das von Breguet erfundene Spiralmetallthermometer.

Will man nicht bestimmte Wärmegrade angeben, sondern nur ganz geringe Aenderungen der Wärme auffinden, so muß man natürlich einen solchen Körper wählen, der durch die Wärme sehr stark ausgedehnt wird, also am einfachsten die atmosphärische Luft. Hierauf gründet sich das Leslie'sche Differentialthermometer (geringe Differenzen im Wärmezustand sollen bemerklich gemacht werden). Es besteht aus einer doppelt rechtwinklig umgebogenen Glasröhre, an deren beiden Enden Kugeln angeblasen sind. Der mittlere und kürzere horizontale Theil, und auch die beiden verticalen Schenkel theilweise sind gewöhnlich mit gefärbter Schwefelsäure (einer nicht leicht verdunstenden Flüssigkeit) gefüllt, während in dem übrigen Theil der verticalen Schenkel und in den Kugeln sich atmosphärische Luft befindet. Zwischen beiden Kugeln ist ein Schirm angebracht. So lange die Luft in beiden Kugeln eine gleiche Temperatur hat, steht auch die Schwefelsäure in beiden Schenkeln gleich hoch. Wächst oder fällt aber die Temperatur der Luft in der einen Kugel, so sinkt oder steigt durch Ausdehnung oder Zusammenziehung der Luft die Schwefelsäure in dem mit dieser Kugel verbundenen Schenkel. Das Rumford'sche Differentialthermometer unterscheidet sich von dem Leslie'schen nur dadurch, daß der horizontale Theil der Röhre viel länger, die verticalen Schenkel dagegen bedeutend kürzer sind, und daß die Luft in der Mitte nur durch ein ganz kleines Flüssigkeitssäulchen getrennt ist. Auch das erste, von dem Holländer Cornelius Drebbel im Jahre 1638 erfundene Thermometer war ein Luftthermometer, doch war seine Scale eine ganz willkürliche, da er noch keine festen Punkte kannte, auf welche er sie hätte basiren können. Dieser Umstand sowohl, als auch der, daß seine die Luft absperrende Flüssigkeit mit der äußeren Luft in Verbindung stand, wodurch natürlich jede Veränderung des äußeren Luftdrucks auch eine Veränderung in der Länge der abgesperrten Luftsäule zur Folge haben mußte, zeigen hinlänglich, wie unvollkommen noch diese erste Einrichtung war.

Sollen sehr hohe Grade von Wärme gemessen werden, so reichen die gewöhnlichen Thermometer ebenfalls nicht aus. Denn auch abgesehen davon, daß zu diesem Zwecke die Thermometerröhren unverhältnißmäßig lang sein müßten, wird der Weingeist schon unter dem Siedepunkt, und das Quecksilber bei einer Temperatur von 360° in Dämpfe verwandelt. Man hat daher zu diesem Zwecke andere Instrumente construirt, und ihnen den Namen Pyrometer (πῦρ Feuer, μετρεῖν messen) beigelegt. Im Allgemeinen muß bemerkt werden, daß die verschiedenen, bis jetzt construirten Pyrometer keinen großen Grad der Genauigkeit in der Messung zulassen. Wir erwähnen hier das Pyrometer von Daniell, das auf der ungleichen Ausdehnung des Reißbleies und des Platins, und das von Petersen, das auf der ungleichen Ausdehnung des Eisens und des Platins beruht. In beiden Fällen wird, wenn beide mit einander verbundene Körper derselben Hitze ausgesetzt waren, aus der Differenz der beobachteten Ausdeh-

Digitized by Google

nungen auf die Größe der Hitze geschlossen. Pouillet's Pyrometer besteht aus einem kugelförmigen, hohlen Platingefäße, das sich in eine feine Röhre endet. Wird dieses der zu messenden Hitze ausgesetzt, so dehnt sich die darin befindliche Luft um so stärker aus, und entweicht deßwegen durch die Röhre in um so größerer Menge, je größer die Hitze ist. Bringt man das Gefäß in diesem Zustande in Wasser, so tritt durch den äußeren Luftdruck so lange Wasser ein, bis die zurückgebliebene Luft wieder die gewöhnliche Dichte erlangt hat. Aus der Menge des eingetretenen Wassers kann man dann die Menge der ausgetretenen Luft, und aus dieser den Grad der Hitze berechnen. Sehr bekannt ist auch Wedgewood's Pyrometer, das aus einer Anzahl Thoncylinder und 2 convergirenden eisernen Linealen besteht. Da sich der Thon in der Hitze zusammenzieht, so wird aus der Größe dieser Zusammenziehung, die dadurch gefunden wird, daß man sieht, wie weit sich der angewandte Thoncylinder vor und nach dem Versuche zwischen die Lineale schieben läßt, auf die Größe der Hitze geschlossen. Das Instrument ist aber schon deßhalb unzuverlässig, weil die Zusammenziehung des Thons nicht nur von der Größe der Hitze, sondern auch von der Dauer der Einwirkung derselben abhängt.

§. 303. **Ausdehnung der festen Körper.** 1) Man nehme gleich lange, cylindrische, am einen Ende zugespitzte Stäbe von verschiedenen festen Körpern, spanne sie nach einander mit dem stumpfen Ende in horizontaler Lage fest ein, während das spitze Ende sich grade an den kürzeren Arm eines Winkelhebels anstemmt, ohne denselben noch zu bewegen. Werden dann die Stäbe gleich stark erwärmt, so sieht man den längeren Arm des Hebels sich verschieden weit über eine hinter demselben angebrachte Kreistheilung bewegen. 2) Ein Eisen- und ein bei gewöhnlicher Temperatur gleich langer Zinkstreifen seien auf einander genietet, so daß der verbundene Streifen eben ist. Wird derselbe erwärmt oder erkältet, so krümmt er sich, und zwar im ersten Falle so, daß das Zink auf der convexen, und im zweiten Falle, daß es auf der concaven Seite liegt. Man nennt einen solchen verbundenen Streifen einen Compensationsstreifen (compensare, ausgleichen).

Daß in 1 die Bewegung des Hebels nur dadurch erfolgt, daß der Stab bei der Erhitzung sich nach seinem freien Ende hin ausdehnt, und dabei auf den kürzeren Hebelarm drückt, ist leicht ersichtlich; ebenso auch, daß die Ausdehnung des Stabes desto größer sein muß, je weiter sich der längere Hebelarm unter sonst gleichen Umständen über die Scale bewegt. Auch die Krümmung des Compensationsstreifens ist nur möglich, wenn der eine Theil desselben, das Zink oder das Eisen, über den anderen hinaus will. Diesem Bestreben kann er nicht folgen, weil er durch die Nietung mit dem anderen fest verbunden ist; um ihm aber einigermaßen zu genügen, muß er sich krümmen, und zieht dabei den andern Theil mit. Wir haben also in diesen Versuchen den experimentellen Beweis für die schon erwähnte Behauptung, daß verschiedene feste Körper bei gleicher Erhitzung sich verschieden stark ausdehnen. Sobald dieses Resultat gefunden war, mußte es wünschenswerth sein, auch die verschiedene Größe der Ausdehnung in den einzelnen Fällen numerisch bestimmen zu können. Man sollte glauben, daß dies ganz einfach auf die Weise erreicht würde, daß man die Länge des Stabes sowohl vor, als nach dem Versuche genau messe; allein dem

Digitized by Google

steht der Umstand entgegen, daß die Ausdehnung der festen Körper zu gering ist, als daß sie durch directe Messung mit hinlänglicher Genauigkeit bestimmt werden könnte. Man mußte also die zu messende Größe vergrößert darzustellen suchen, wie dies in dem zu Anfang unseres §. beschriebenen Apparate dadurch geschieht, daß man dem einen Arm des Hebels im Verhältniß zu dem anderen eine bedeutende Länge gibt. Sobald daher die Länge eines Stabes vor dem Versuche, das Verhältniß der beiden Hebelarme zu einander, und der Werth eines Grades der Scale bekannt sind, läßt sich der Apparat auch zur wirklichen Messung der Ausdehnung benutzen. Doch gibt er immer nur ungenaue Resultate, wie sich schon aus dem Umstande ergibt, daß bei der Erhitzung des Stabes durch die gleichzeitig stattfindende Erwärmung der Umgebung auch die Entfernung des Befestigungspunktes von dem Endpunkte des kürzeren Hebelarmes mehr oder weniger verändert wird. Man hat deßhalb andere vollkommnere Instrumente zu diesem Zwecke construirt, deren nähere Beschreibung aber hier zu weit führen würde. Durch Versuche mit solchen Instrumenten hat man gefunden, daß für denselben Körper die Ausdehnung nicht immer der Zunahme der Temperatur proportional ist, sondern daß sie namentlich bei höheren Temperaturen in einem stärkeren Verhältnisse wächst, daß sie aber zwischen dem Gefrier- und Siedepunkt ohne erheblichen Fehler als der Wärmezunahme proportional angesehen werden kann. Auch hat man für eine ziemliche Anzahl verschiedener fester Körper ermittelt, um wieviel ihrer Länge sie sich ausdehnen, wenn sie von 0° bis 100° erwärmt werden, und es mögen von den gefundenen Zahlen hier nur einige angeführt werden, für Glas z. B. beträgt dies 0,000861, für Schmiedeeisen 0,00122, für Gußeisen nur 0,00107, für Zink dagegen 0,00298. Man darf jedoch nicht vergessen, daß diese Zahlen sich nur auf die Ausdehnung nach einer Dimension, nach der Länge, beziehen, also nur die lineare Ausdehnung angeben. Will man die Größe der Ausdehnung der Körper für eine Temperaturzunahme von nur 1 Grade wissen, so hat man offenbar die gefundenen Zahlen nur durch 100 zu dividiren; die neuen Zahlen, welche man dadurch erhält, nennt man die linearen Ausdehnungscoefficienten der Körper. Setzen wir die Länge eines Körpers bei $0^\circ = 1$; und bezeichnen seinen Ausdehnungscoefficienten mit a, so ist also die Länge desselben Körpers bei t° Wärme $= 1 + at$. Nun dehnen sich aber die Körper nicht nur nach einer, sondern nach allen Richtungen aus. Diese Vergrößerung ihres Volumens nennt man ihre cubische Ausdehnung. Um diese zu finden, bezeichne man wieder das Volumen des Körpers bei 0° mit 1, und den cubischen Ausdehnungscoefficienten mit A, während a den oben angegebenen Werth behält, so ist offenbar bei Zunahme der Temperatur um 1 Grad $1 + A = (1 + a)^3 = 1 + 3a + 3a^2 + a^3$. Nun ist aber bei festen Körpern, wie wir gesehen haben, a stets ein sehr kleiner Bruch, die Potenzen von a werden daher noch viel kleiner so daß man ohne erheblichen Fehler $3a^2$ und a^3 ganz vernachlässigen kann; geschieht dies, so ist $1 + A = 1 + 3a$ oder $A = 3a$, d. h. der cubische Ausdehnungscoefficient ist 3mal so groß, als der lineare.

Bei der eben gegebenen Herleitung ist indessen angenommen, daß die festen Körper sich nach allen Richtungen hin gleich stark ausdehnten. Dies ist jedoch nicht allgemein wahr, da Mitscherlich im Jahre 1823 bei

Digitized by Google

Krystallen nach verschiedenen Richtungen hin eine verschiedene Ausdehnung nachgewiesen hat. Er fand nämlich, daß nur die Krystalle des regulären Systems sich gleichmäßig ausdehnen, daß bei Krystallen des quadratischen und heragonalen Systems die Ausdehnung in der Richtung der Hauptare stets sich unterscheidet von derjenigen in den Richtungen der Nebenaren, in diesen aber einen gleichen Werth hat, und daß in den 3 letzten Krystallsystemen die Ausdehnung nach jeder der 3 Aren eine verschiedene ist. Ein Körper nämlich, der sich gleichmäßig ausdehnt, kann, da alle Dimensionen um gleich Viel verändert werden, seine Gestalt nicht verändern, wohl aber muß dies geschehen, sobald die Ausdehnung nach verschiedenen Richtungen ungleichmäßig wird. Durch eine Veränderung der Gestalt eines Krystalls wird aber auch eine Veränderung seiner Winkel bedingt, und diese läßt sich durch ein Goniometer nachweisen.

§. 304. **Fortsetzung.** Die mechanische Gewalt, mit welcher die Ausdehnung oder Zusammenziehung erfolgt, ist offenbar so groß, wie das Gewicht, welches entweder an dem Körper ziehen oder auf ihn drücken müßte, um eine gleiche Zu- oder Abnahme seiner Länge zu bewirken. Daraus läßt sich schließen, daß sie in manchen Fällen sehr bedeutend sein müsse. Man sucht sie daher auch in manchen Fällen zu benutzen. So werden die eisernen Reife im glühenden Zustande um die Räder gelegt; wenn sie dann erkalten, so verbinden sie sich durch ihre Zusammenziehung fest mit dem Rade. Molard hat in Paris an einem Gebäude, an welchem die Mauern aus ihrer verticalen Lage gewichen waren, diese Mauern dadurch wieder grade gerichtet, daß er die durch dieselben gezogenen starken, eisernen Anker, während sie ihrer Länge nach erhitzt wurden, durch Schrauben anziehen und dann erkalten ließ. Auf der anderen Seite muß aber auch in vielen Fällen dafür Sorge getragen werden, daß diese Gewalt nicht nachtheilig und zerstörend einwirken könne. Namentlich muß bei der Construction von Maschinen und bei Bauwerken darauf Rücksicht genommen werden, daß diejenigen Theile, welche einem öfteren Wechsel der Temperatur ausgesetzt sind, einen hinreichenden Spielraum für ihre Ausdehnung und Zusammenziehung finden. So dürfen z. B. bei Eisenbahnen die Schienen nie so gelegt werden, daß sie sich mit ihren Enden gegenseitig berühren, sondern es muß immer ein kleiner Zwischenraum für die Ausdehnung gelassen werden; so dürfen Glasscheiben nie genau in Fensterrahmen eingepaßt werden, wenn man das Zerspringen derselben verhüten will, u. s. w.

Noch eine andere Anwendung, welche man von der ungleichen Ausdehnung der festen Körper durch die Wärme gemacht hat, muß hier erwähnt werden. Zu genauen Beobachtungen ist nämlich oft eine ganz genaue Bestimmung der Zeit erforderlich. Eine gewöhnliche Pendeluhr kann diese aber nicht geben, weil das Pendel, das den Gang der Uhr regulirt, ebenfalls den Einwirkungen der Wärme unterliegt, also im Sommer länger ist, als im Winter, und daher im Sommer langsamer schwingt, als im Winter. Diesem Uebelstande nun abzuhelfen, und einer Uhr das ganze Jahr hindurch einen gleichmäßigen Gang zu verschaffen, hat man das Compensationspendel erdacht.

Digitized by Google

Fig. 90.

Die bekannteste Construction eines solchen ist das s. g. Rostpendel (so genannt nach seiner Gestalt), dessen Einrichtung aus Fig. 90 hinlänglich ersichtlich ist. Die mit e bezeichneten Theile sind von Eisen, und die mit z bezeichneten von Zink. Die eisernen Stäbe können sich nur nach Unten, die zinkenen nur nach Oben ausdehnen. Das Verhältniß der Länge beider Arten von Stäben muß natürlich, um den beabsichtigten Zweck zu erreichen, aus den bekannten Ausdehnungscoefficienten von Zink und Eisen so bestimmt werden, daß, wenn der Schwingungspunkt durch die Ausdehnung des Eisens um eine gegebene Größe gesenkt wird, er durch die in entgegengesetzter Richtung erfolgende Ausdehnung des Zinks um dieselbe Größe wieder gehoben wird. Viel einfacher ist die Quecksilbercompensation. Mit dem freien Ende der eisernen Pendelstange steht ein cylindrisches Quecksilbergefäß in Verbindung, der Schwingungspunkt befindet sich nahe bei der Mitte des Quecksilbercylinders, und die Menge des Quecksilbers muß so ermittelt sein, daß sich der Schwingungspunkt des Pendels durch die Ausdehnung der Stange nach Unten um eben so viel senkt, als er sich durch die Ausdehnung des Quecksilbers nach Oben erhebt, wodurch dann die Entfernung des Schwingungspunktes von dem Aufhängepunkt, und dadurch die Dauer einer Schwingung stets unverändert erhalten wird. Die Compensationspendel sind im Jahre 1728 von Harrison erfunden worden.

§. 305. **Ausdehnung tropfbar flüssiger Körper.** 1) Man nehme eine überall gleichweite Glasröhre, an deren einem Ende eine weitere Kugel angeblasen ist, fülle in dieselbe so viel Quecksilber, daß es die Kugel nicht nur ausfüllt, sondern auch noch etwas in die Röhre reicht, bestimme das Gewicht dieses Quecksilbers, indem man die Röhre abwägt, und von dem gefundenen Gewichte das schon vorher bestimmte Gewicht der leeren Glasröhre abzieht, bemerke den Punkt, bis zu welchem das Quecksilber in der Röhre reicht, dann wäge man noch $\frac{1}{10}$ des Quecksilbers ab, fülle dies ebenfalls in die Röhre, und bemerke auch den Punkt, bis zu welchem das Quecksilber jetzt steht. Den ersten gefundenen Punkt bezeichne man mit 0, den letzten mit 100, und theile den Abstand beider in 100 gleiche Theile. Nun wird das Quecksilber wieder ausgegossen, und die Röhre mit einer anderen tropfbaren Flüssigkeit von 0° bis zu dem Nullpunkt gefüllt, dann bis zu verschiedenen Temperaturen erwärmt, und die Punkte beobachtet, bis zu welchen die Flüssigkeit steigt. Diese Versuche werden dann auch mit anderen tropfbaren Flüssigkeiten wiederholt. Man wird sich überzeugen, daß eine und dieselbe Flüssigkeit nicht immer bei gleicher Temperaturzunahme um gleich viele Theilstriche steigt, und daß verschiedene Flüssigkeiten bei derselben Temperatur auch nicht bis zu demselben Theilstriche reichen. 2) De Luc füllte 5 verschiedene Thermometerröhren mit 5 verschiedenen Flüssigkeiten, bestimmte für alle den Fundamentalabstand ganz auf dieselbe Weise, und fand, daß diese Thermometer in ihren Angaben nie übereinstimmten, außer bei dem Gefrier- und Siedepunkt.

Im ersten Versuche wird durch das vorbereitende Verfahren mit

Digitized by Google

Quecksilber zunächst das Verhältniß des Volumens von einem Stücke der Röhre zu dem Volumen der Kugel gefunden. Es leuchtet nämlich ein, daß, wenn man das Volumen der Kugel und des Theils der Röhre bis zu dem Nullpunkt = 1 setzt, das Stück der Röhre von dem Nullpunkt bis 100 = $\frac{1}{100}$, und folglich das Volumen von einem Theilstrich bis zu dem nächsten immer = $\frac{1}{10000}$ ist. In dem Apparate kann also die Ausdehnung einer Flüssigkeit bis auf $\frac{1}{10000}$ genau beobachtet werden. Da nun eine und dieselbe Flüssigkeit bei gleicher Temperaturzunahme nicht immer um gleich viele Theilstriche steigt, so folgt daraus, daß bei ihnen die Annahme, daß die Ausdehnung der Wärmezunahme proportional sei, nicht einmal innerhalb des Fundamentalabstandes Geltung hat, wie doch bei den festen Körpern angenommen werden konnte, und daß also von einem Ausdehnungscoefficienten bei ihnen keine Rede sein kann. Bei den festen Körpern hatte man gefunden, daß ihre Ausdehnung desto ungleichförmiger wird, je mehr sie sich ihrem Schmelzpunkte nähern. Auch die meisten Flüssigkeiten befinden sich innerhalb des Fundamentalabstandes bald einem Punkte nahe, bei welchem sie fest, bald einem anderen, bei welchem sie luftförmig werden, und es scheint sonach als allgemeines Gesetz zu gelten, daß die Ausdehnung durch die Wärme ungleichmäßig wird, sobald sich ein Körper einem anderen Aggregatzustande nähert. Daraus aber, daß verschiedene Flüssigkeiten bei derselben Temperatur nicht bis zu demselben Theilstriche sich erheben, folgt, daß auch bei den tropfbaren Flüssigkeiten die Größe der Ausdehnung, ebenso wie bei den festen Körpern, von der materiellen Beschaffenheit derselben bedingt ist. Das erste in 1 gefundene Resultat wird auch durch den zweiten Versuch auf sehr augenscheinliche Weise bestätigt, da offenbar, wenn die Ausdehnung gleichmäßig erfolgte, auch alle Flüssigkeiten bei gleicher Temperatur auf demselben Theilstriche ihrer entsprechenden Scalen stehen müßten.

Bei der hier beschriebenen Methode, die Ausdehnung tropfbarer Flüssigkeiten zu messen, muß jedoch bemerkt werden, daß alle gefundenen Resultate zu klein sind, weil sich ja auch das Glas nach derselben Richtung, wie die Flüssigkeit, ausdehnt, und dadurch alle Theilstriche der Scale höher gerückt werden. Da indeß die Ausdehnung des Glases im Verhältniß zu derjenigen einer tropfbaren Flüssigkeit nur unbedeutend ist, so kann sie, wenn es nicht auf große Genauigkeit ankommt, unberücksichtiget bleiben. Auf der gleichzeitigen Ausdehnung des Glases beruht auch die auf den ersten Anblick sonderbare Erscheinung, daß, wenn man ein Thermometer mit etwas großer Kugel schnell in heißes Wasser taucht, es im ersten Augenblicke fällt, umgekehrt aber steigt, wenn es rasch in Schnee gebracht wird. Die Temperaturveränderung wirkt nämlich zuerst nur auf das Glas ein, und braucht einige, wenn auch nur kurze Zeit, um sich auch dem Quecksilber mitzutheilen.

Eine andere Methode hat Gay-Lussac angegeben. Man nehme ein nicht sehr enges Glasgefäß, dessen Hals an einer markirten Stelle ganz eng ausgezogen ist, so daß sich über dieser Stelle noch eine trichterförmige Erweiterung befindet. Man füllt das Gefäß mit einer Flüssigkeit, bringt es dann in schmelzendes Eis, damit die Flüssigkeit die Temperatur 0° erhält, nimmt alle noch über der Marke stehende Flüssigkeit weg, und bestimmt nun das Gewicht, von welchem aber das Gewicht des leeren Glas-

Digitized by Google

gefäßes abgezogen werden muß. Wird dann das Gefäß bis zu einem bestimmten Grade erwärmt, so tritt ein Theil der Flüssigkeit auch in die trichterförmige Erweiterung. Dieser wird wieder bis zur Marke weggenommen, und dann abermals gewogen. Gesetzt, das erstere Gewicht sei a, das letztere b, dann beträgt die Ausdehnung für die angenommene Temperatur offenbar $\frac{a - b}{b}$, da, wenn man das Volumen des Gefäßes in b gleiche Theile getheilt denkt, die ausgetretene Flüssigkeit a — b dieser Theile eingenommen hat.

Auch die Bestimmung des specifischen Gewichtes gibt uns ein Mittel an die Hand, die Ausdehnung einer tropfbaren Flüssigkeit durch die Wärme zu bestimmen. Wenn man nämlich vermittelst eines Aräometers das specifische Gewicht einer Flüssigkeit bei verschiedenen Wärmegraden bestimmt, so müssen sich die Volumina umgekehrt wie die specifischen Gewichte verhalten. Daß auch die letzteren beiden Methoden mit demselben Fehler behaftet sind, wie die erste, und also wegen der gleichzeitigen Ausdehnung des Gefäßes und des Aräometers die Ausdehnung ebenfalls zu klein angeben, leuchtet ein. Nur die von Dulong und Petit angegebene Methode ist von diesem Fehler frei, und lehrt uns die absolute oder wirkliche Ausdehnung von Flüssigkeiten kennen. Zwei verticale Glascylinder sind durch eine enge Röhre mit einander verbunden. Wird nun eine Flüssigkeit eingegossen, so wird sie in beiden Cylindern gleich hoch stehen. Wird aber jeder Cylinder von einem weiteren Gefäße umschlossen, und in eins derselben schmelzendes Eis, in das andere bis zu einer bestimmten Temperatur erhitztes Oel gebracht, so wird die Flüssigkeit in beiden Cylindern nicht mehr gleiche Höhe zeigen, und aus dem gemessenen Unterschiede der Höhen läßt sich dann leicht die Vergrößerung des Volumens von 0° bis zu der Temperatur, welche das Oel hatte, berechnen.

§. 306. **Fortsetzung; Ausdehnung des Wassers.** In ein hohes Glas fülle man Wasser von 0°, bringe ein Thermometer mit seiner Kugel nahe unter die Oberfläche, und ein zweites Thermometer senke man bis auf den Boden des Glases. Wird das Wasser mit dem Glase in ein warmes Zimmer gebracht, so erwärmt es sich allmählig. Anfangs steigt aber das untere Thermometer schneller, als das obere; bei 4° wird es von dem oberen eingeholt, und bei weiterer Erwärmung bleibt es sogar etwas gegen das obere zurück.

Die Erwärmung theilt sich nur nach und nach den einzelnen Wassertheilchen mit. Würden die zuerst erwärmten nun durch die Wärme ausgedehnt, und dadurch specifisch leichter, so müßten sie sich offenbar über die übrigen noch nicht erwärmten lagern, und das obere Thermometer müßte höher stehen, als das untere. Da aber die Erfahrung wenigstens zwischen 0° und 4° grade das Gegentheil zeigt, so läßt sich dieser Widerspruch nur dadurch aufheben, daß man annimmt, das Wasser mache von dem allgemeinen Gesetze, nach welchem alle Körper sich bei einer Zunahme von Wärme ausdehnen, eine Ausnahme, und ziehe sich zwischen 0° und 4° im Gegentheil immer mehr zusammen, so daß es specifisch schwerer werde, und dadurch zu Boden sinke. Bei einer weiteren Erwärmung über 4° steht

Digitized by Google

das obere Thermometer etwas höher, das Wasser muß also, wie alle übrigen Körper, von dieser Temperatur an dem allgemeinen Gesetze unterworfen sein, wovon man sich auch durch die in dem vorhergehenden Paragraph erwähnten Methoden hinlänglich überzeugen kann. Das Wasser ist bei Beibehaltung des Aggregatzustandes bis jetzt der einzige Körper, an welchem dieses abweichende Verhalten beobachtet wurde, kein anderer zeigt ein solches Dichtigkeitsmaximum, über das hinaus er bei weiterer Abkühlung sich wieder ausdehnt. Die Kenntniß dieser Eigenthümlichkeit des Wassers ist schon deßwegen für den Physiker von Wichtigkeit, weil er bei der Bestimmung des specifischen Gewichtes, wie wir gesehen haben, alle Körper mit dem Wasser vergleicht, und es bei genauen Bestimmungen sehr darauf ankommt, bei welcher Temperatur diese Vergleichung vorgenommen wird. Noch viel wichtiger aber ist dieses Verhalten des Wassers in dem Haushalte der Natur. Durch dasselbe wird verhindert, daß selbst in den strengsten, anhaltendsten Wintern stehende Gewässer, wie Seeen und Teiche, nicht durchaus gefrieren können. Denn sobald die Temperatur unter 4° fällt, sinkt das an der Oberfläche abgekühlte Wasser nicht mehr zu Boden, sondern bleibt an der Oberfläche, während das Wasser am Boden 4° warm ist. Kommt die Temperatur unter den Gefrierpunkt, so bildet sich auf der Oberfläche das Eis. Die entstandene Eisdecke hält aber die Wärme des unteren Wassers zusammen, da Eis, wie wir §. 331 sehen werden, zu den schlechten Wärmeleitern gehört. Nur dadurch wird es möglich, daß den in dem Wasser lebenden Thieren ihr Dasein erhalten wird.

Der eben gegebenen Auseinandersetzung scheint jedoch die Bildung des Grundeises zu widersprechen. Wir haben aber von stehenden Gewässern gesprochen, und in diesen bildet sich kein Grundeis, sondern nur im fließenden Wasser, in Bächen, Flüssen und Strömen. Hier ist es grade die Bewegung, in welcher sich die Wassertheilchen befinden, welche die schichtenweise Uebereinanderlagerung der Wassertheilchen nach ihrer verschiedenen Dichte verhindert. Durch die Bewegung werden die Theilchen beständig unter einander gemischt, und dadurch die Unterschiede ihrer Temperatur ausgeglichen, so daß nach und nach die ganze Masse sich bis auf 0° abkühlt. Nun beginnt aber die Krystallisation immer zuerst an festen Körpern, welche mit der Flüssigkeit in Berührung sind (§. 17), also in unserem Falle am Flußbette. Die Eisbildung kann hier noch um so ungestörter vor sich gehen, weil sich hier die Wassertheilchen auch mit geringerer Geschwindigkeit, als nahe unter der Oberfläche, bewegen. Indem sich an die zuerst gebildeten Krystalle immer neue ansetzen, vermehrt sich ihre Masse, und wird, da Eis specifisch leichter, als Wasser ist, dann bis an die Oberfläche gehoben, und von der Strömung mit fortgerissen. Hat aber das Grundeis einmal eine Decke über den Fluß gebildet, dann schützt diese das darunter befindliche Wasser in hohem Grade gegen das weitere schnelle Eindringen der Kälte.

§. 307. **Ausdehnung der ausdehnsam flüssigen Körper.** 1) Man nehme eine calibrirte Glasröhre, an deren eines Ende eine Kugel angeblasen ist, bestimme das Volumen der Röhre im Verhältniß zu dem Volumen der Kugel (§. 305), theile dann die Röhre so, daß die Theilung Volumentheile angibt, mache die Röhre dadurch, daß man Quecksilber in derselben auskocht, vollkommen trocken, fülle sie mit einem über Chlorcalcium ge

Digitized by Google

strichenen Gase (wodurch das Gas, falls ihm noch Feuchtigkeit anhaften sollte, getrocknet wird), sperre das Gas durch ein kleines Quecksilbersäulchen von der äußeren Luft ab, bringe dann den Apparat in horizontaler Lage in schmelzenden Schnee, und bemerke, bis wieweit sich das Quecksilbersäulchen hineinzieht, da der Stand desselben auf der Scale das Volumen des Gases bei 0° angibt. Hierauf bringe man ihn ebenfalls in horizontaler Lage in siedendes Wasser, und beobachte abermals den Stand des Quecksilbers, so findet man auf diese Weise die Vermehrung des Volumens bei einer Erwärmung von 0° bis 100°. Oder man kann auch so verfahren: man ziehe das offene Ende der Röhre in eine feine Spitze aus, tauche sie, nachdem sie mit vollkommen getrockneter Luft gefüllt ist, ganz in siedendes Wasser, so daß nur die Spitze herausragt. Nachdem man überzeugt ist, daß die Luft die Temperatur des Siedepunktes angenommen hat, wird die Spitze zugeschmolzen. Hierauf wird die Röhre in schmelzenden Schnee gebracht, die Spitze unter Quecksilber getaucht, und dann abgebrochen. Wenn dann bei der Erkaltung die Luft sich zusammenzieht, wird durch den äußeren Luftdruck der entstehende leere Raum mit Quecksilber ausgefüllt. Tritt kein Quecksilber weiter in die Röhre, so wird die Oeffnung unter Quecksilber mit Wachs zugeklebt, und nun durch Abwägen bestimmt, wieviel Quecksilber eingedrungen ist. Aus dem Gewichte des eingedrungenen Quecksilbers wird dann dessen Volumen berechnet, welches offenbar dasselbe ist, um welches das Volumen der Luft abgenommen hat. 2) Man ändere den zuerst angegebenen Versuch dahin ab, daß man, nachdem das Volumen bei 0° gefunden ist, die Röhre in Wasser bringt, das man nach und nach immer um gleich viele Grade erwärmt, und die bei den einzelnen Versuchen sich ergebenden Stände des Quecksilbers notirt.

Unter den vielfachen Versuchen, welche auf diese Weise angestellt wurden, müssen zuerst diejenigen erwähnt werden, welche Gay-Lussac (1802) machte. Er erhielt folgende Resultate: 1) Die atmosphärische Luft, sowie jedes andere Gas oder Gasgemenge, dehnt sich bei einer Erwärmung von 0° bis 100° um 0,375 oder $\frac{3}{8}$ seines ursprünglichen Volumens aus, und der Ausdehnungscoefficient aller Gase ist demnach = 0,00375; 2) alle Gase dehnen sich durch die Wärme gleichmäßig aus, d. h. ihre Volumenvergrößerung ist stets der Temperaturzunahme proportional. Neuere Untersuchungen, namentlich von Rudberg, Magnus und Regnault, haben indessen das erste dieser Gesetze etwas modificirt. Sie fanden den Werth 0,375 für die atmosphärische Luft zu hoch, und bestimmten denselben zu 0,3669, also nahe zu $\frac{1}{27}$, fanden auch, daß derselbe nicht für alle Gase vollkommen gleich ist, sondern geringe Unterschiede zeigt, etwas größer wird bei denjenigen Gasen, welche zu tropfbaren Flüssigkeiten comprimirbar sind, und zwar um so größer, je leichter sie tropfbar flüssig werden. So wurde dieser Werth für Kohlensäure = 0,37099 und für schweflige Säure = 0,39028 bestimmt. Weil dessenungeachtet die Unterschiede nur klein sind, so kann man doch, wenn nicht sehr große Genauigkeit verlangt wird, für alle Gase den für die Luft gefundenen Werth 0,3665 oder $\frac{11}{30}$ beibehalten.

Diese Resultate waren aber auch auf theoretischem Wege vorauszusehen. Daß die Ausdehnung durch die Wärme bei den Gasen am größten

Digitized by Google

sein müsse, ist schon oben bemerkt worden. Bei den Gasen ist von den 2 Molecularkräften die Abstoßungskraft vorherrschend, und hat die Wirkung der Anziehungskraft der Molecüle oder die Cohäsion ganz aufgehoben. Diese letztere wirkt aber grade der Wärme entgegen. Wenn sie demnach bei den verschiedenen Gasen als gleich Null angesehen werden kann, so ist kein Grund vorhanden, warum die Gase, wenn die Wärme in gleich hohem Grade auf sie einwirkt, sich verschieden stark ausdehnen sollten. Bei den festen und tropfbar flüssigen Körpern dagegen findet die Wärme sie je nach Verschiedenheit der Cohäsion einen verschieden großen Widerstand. Darin liegt nun auch der Grund, warum diese sich nicht gleichmäßig, sondern bei höheren Temperaturen stärker ausdehnen, da in höheren Temperaturen durch die Einwirkung der Wärme die Cohäsion derselben bereits geringer geworden ist. Bei Gasen fällt dieser Grund wieder weg, indem bei ihnen die Cohäsion bei keiner Temperatur sich wirksam erweist. Doch muß in Beziehung auf das zweite der obigen Gesetze noch bemerkt werden, daß die Versuche, aus denen es hergeleitet ist, streng genommen Nichts Anderes besagen, als daß bei derselben Temperaturzunahme die Ausdehnungen des Quecksilbers mit denen eines Gases in gleichem Verhältnisse wachsen. Denn man hat ja offenbar bei Aufstellung des Gesetzes schon angenommen, daß das Quecksilber sich wirklich gleichmäßig ausdehne. In der Wirklichkeit aber verhält sich die Sache so: Die theoretische Betrachtung ließ, wie so eben gezeigt wurde, bei den Gasen eine gleichmäßige Ausdehnung voraussetzen, der Versuch zeigte, daß bei den Gasen die Ausdehnung der durch die Ausdehnung des Quecksilbers im Thermometer angezeigten Temperatur entsprechend wachse, darin fand man eine Bestätigung der Theorie, und schloß dann, diese jetzt als Wahrheit anerkennend, wieder auf das Quecksilber zurück, indem man auch für das letztere aus den Versuchen eine gleichmäßige Ausdehnung herleitete.

Zweites Kapitel.

Von der Aenderung des Aggregatzustandes durch die Wärme.

§. 308. **Das Schmelzen.** Bringt man an einem kalten Wintertage Schnee in einem Gefäße in eine warme Stube, so zeigt ein hineingehaltenes Thermometer Anfangs die Temperatur der äußeren Luft an. Bald aber fängt das Thermometer an zu steigen, und steigt bis auf 0°. Sobald das Thermometer diesen Stand erreicht hat, beginnt der Schnee flüssig zu werden. Trotz der viel höheren Temperatur des Zimmers steigt nun das Thermometer nicht mehr, sondern bleibt fortdauernd auf 0° stehen, und zwar so lange, bis aller Schnee zu Wasser geworden ist. Von da an aber beginnt das Thermometer wieder zu steigen, und steigt dann so lange, bis es die Temperatur des Zimmers angibt. Selbst wenn man das Gefäß über Feuer setzt, so bleibt doch Alles, wie eben angegeben wurde, nur daß der Proceß des Flüssigwerdens mehr beschleunigt wird. Nimmt man zu diesen Versuchen statt des Schnees andere feste Körper, wie z. B. Wachs, Zinn, Blei u. s. w., so kann man die Phänomene des Flüssigwerdens frei-

Digitized by Google

lich nicht dadurch hervorbringen, daß man sie einfach in eine geheizte Stube bringt, wohl aber, wenn man eine stärkere Wärmequelle auf sie einwirken läßt, auch wird das Thermometer bei dem einen Körper bis zu einem höheren Grade steigen, als bei einem anderen, aber stets wird man beobachten, daß das Thermometer aufhört zu steigen, sobald der Körper anfängt, flüssig zu werden, und daß es dann seinen Stand so lange unverändert beibehält, bis der feste Körper vollständig tropfbar flüssig geworden ist, mag ihm auch noch so viele Wärme zugeführt werden.

Außer der Einwirkung auf das Gefühl und der Vergrößerung des Volumens der Körper lernen wir also hier noch eine dritte Wirkung der Wärme kennen; wir sehen nämlich, daß sie im Stande ist, den Aggregatzustand eines Körpers zu verändern. Der Aggregatzustand ist, wie früher gezeigt wurde, bedingt durch das Verhältniß der beiden Molecularkräfte zu einander. Da nun die Wärme dieses Verhältniß stört, indem sie die Cohäsion mehr oder weniger aufhebt, so ist leicht begreiflich, wie durch dieselbe ein Zustand herbeigeführt werden kann, in welchem ein fester Körper, weil die Cohäsionskraft seiner Theilchen nicht mehr größer ist, als die abstoßende Molecularkraft, auch nicht mehr fest bleiben kann, sondern tropfbar flüssig werden muß. Nun aber wirkt die Wärme auf alle Körper ohne Ausnahme ausdehnend, und dadurch die Cohäsion schwächend, und zwar um so mehr, je stärker sie einwirkt. Man sollte demnach vermuthen, daß auch alle festen Körper ohne Ausnahme durch Einwirkung der Wärme in den tropfbar flüssigen Aggregatzustand übergeführt werden könnten und müßten. Dem widerspricht aber die Erfahrung. Sie zeigt, daß namentlich zusammengesetzte Körper, deren Bestandtheile eine verschiedene Temperatur erfordern, um flüssig zu werden, und dabei keine sehr große chemische Verwandtschaft zu einander besitzen, oft durch die Wärme in ihre Bestandtheile zersetzt werden, statt in den tropfbar flüssigen Aggregatzustand überzugehen. Hierher gehören besonders die organischen Körper, wie Holz u. a., aber auch unorganische. Doch hat Hall gefunden, daß man bei solchen Körpern nur das Entweichen ihrer flüchtigen Bestandtheile dadurch verhindern müsse, daß man sie während des Erhitzens einem sehr starken Drucke aussetzt, um auch sie tropfbar flüssig machen zu können. Die Versuche sind ihm namentlich mit Marmor und mehreren vulkanischen Substanzen gelungen. Von einfachen Körpern hat man bis jetzt nur die Kohle durch keinen erreichbaren Hitzegrad tropfbar flüssig machen können, woraus aber doch wohl nur geschlossen werden kann, daß wir noch nicht den Grad der Temperatur hervorbringen können, der dazu erforderlich ist. Erwähnt muß auch werden, daß keine andere Kraft im Stande ist, den Aggregatzustand eines Körpers zu ändern, und daß diese Wirkung daher der Wärme ausschließlich und allein zukommt.

Das Ueberführen eines festen Körpers in einen tropfbar flüssigen durch die Wärme nennt man das Schmelzen, und die Temperatur, bei welcher für verschiedene Körper dieser Uebergang stattfindet, ihren Schmelzpunkt. Schon oben ist ausgesprochen, daß der Schmelzpunkt für verschiedene Körper sehr verschieden sei; er ist z. B. für Stabeisen 1500—1600°, für Zink 360°, für Talg 40°. Man unterscheidet leicht- und strengflüssige Körper, je nachdem der Schmelzpunkt derselben niedrig oder hoch liegt. Die Schmelzpunkte können nur durch Versuche ermittelt werden, da

Digitized by Google

sich zwar im Allgemeinen zeigt, daß die Schmelzpunkte höher liegen für solche Körper, die eine größere Cohäsion haben, aber ein Gesetz der Abhängigkeit zwischen Cohäsion und Schmelzpunkt noch nicht gefunden ist. Eben so wenig läßt sich der Schmelzpunkt eines zusammengesetzten Körpers aus den Schmelzpunkten der einzelnen Bestandtheile berechnen. Wir kennen Legirungen von Metallen, die viel früher schmelzen, als selbst das leichtflüssigste Metall in ihnen. Das bekannteste Beispiel ist das Rose'sche Metallgemisch, bestehend aus 2 Theilen Wismuth, 1 Theil Blei und 1 Theil Zinn, welches schon im siedenden Wasser schmilzt, während der Schmelzpunkt von Wismuth 256°, von Blei 334° und von Zinn 230° ist. So können auch sehr strengflüssige Körper oft dadurch, daß man ihnen andere hinzufügt, leichter in Fluß gebracht werden. Zur Ersparung von Brennmaterial macht man davon Anwendung bei den Hochöfen. Den Körper, welchen man zusetzt, nennt man den Zuschlag (Schwefel für Eisen, Zinn und Blei für Silber und Kupfer, Borax und Flußspath, der grade davon seinen Namen führt, für Erden).

Bemerkenswerth ist noch der Umstand, daß während des Schmelzens die Temperatur des Körpers nicht mehr steigt, wenn ihm auch noch so viele Wärme zugeführt wird. Diese Wärme kann nicht spurlos verloren gegangen sein, wenn sie auch weder auf das Gefühl, noch ausdehnend auf das Quecksilber des Thermometers einwirkt, und wir können uns daher nur vorstellen, daß sie sich mit dem Körper gewissermaßen verbunden, daß sie ihren Sitz zwischen den Molecülen desselben genommen habe, um da der Wirksamkeit der Cohäsion entgegenzutreten. Man nennt sie daher auch latente (lateo, ich bin verborgen) oder gebundene Wärme im Gegensatz zur freien Wärme, die ihr Vorhandensein durch ihre Einwirkung auf das Gefühl und das Thermometer beurkundet. Wie man in den einzelnen Fällen die Menge der latenten Wärme bestimmen könne, davon wird noch weiter unten (§. 321) die Rede sein. Von der Erfahrung, daß bei dem Uebergang eines festen Körpers in den tropfbar flüssigen Aggregatzustand Wärme gebunden wird, macht man eine Anwendung in den s. g. Kältemischungen. Wenn man nämlich zwei feste Körper, oder einen festen und einen flüssigen Körper, die ein Bestreben haben, sich mit einander zu vereinigen, zusammenbringt, so können sie diesem Streben offenbar nur dann Genüge leisten, wenn sie beide tropfbar flüssig sind. Dazu bedürfen sie aber viel Wärme, und diese werden sie daher ihrer Umgebung entziehen, welche sich dadurch mehr oder weniger stark abkühlen muß. Eine solche Kältemischung ist bereits §. 301 erwähnt, nämlich die aus 3 Theilen Schnee und 1 Theil Kochsalz, welche zur Bestimmung des Nullpunktes der Fahrenheit'schen Scala dient. Andere bestehen aus salzsauerem Kalk (3 Th.) und Schnee (2 Th.), oder aus verdünnter Schwefelsäure und Schnee zu gleichen Theilen. Sie finden nicht nur bei wissenschaftlichen Untersuchungen Anwendung, sondern auch in der Zuckerbäckerei zur Bereitung des Gefrornen. Die durch sie hervorgebrachten Kältegrade sind im Allgemeinen um so größer, je feiner die festen Körper pulverisirt sind, und je inniger man sie mit einander mischt, durch welche beide Umstände eine schnellere Auflösung möglich gemacht wird.

Auch noch folgende Unterschiede lassen sich bei dem Schmelzen verschiedener Körper beobachten. Einige, wie z. B. Wachs und alle fetten

Digitized by Google

Körper, werden erst weich, ehe sie schmelzen, und nehmen nach und nach alle Grade der Weichheit an, andere, wie das Eis, thun dies nicht. Einige, wie Blei und andere Metalle, schmelzen gleichzeitig durch ihre ganze Masse, andere, wie wiederum das Eis, nur von Theil zu Theil.

§. 309. **Das Erstarren.** 1) Hat man geschmolzenes Blei noch über seinen Schmelzpunkt erwärmt, entzieht es dann der ferneren Einwirkung der Wärme, so nimmt seine Temperatur nach und nach ab dadurch, daß es jetzt selbst Wärme an seine Umgebung abgiebt. Sobald aber seine Temperatur bis auf 334° gesunken ist, sehen wir es wieder den festen Aggregatzustand annehmen. 2) Füllt man eine offene Flasche ganz mit Wasser, und setzt sie im Winter der Kälte aus, so daß das Wasser gefriert, so findet man, daß das Eis aus dem Halse der Flasche hervorragt. Gießt man dagegen geschmolzenes Messing in Formen, und läßt es in denselben fest werden, so zeigt sich, daß der feste Körper kleiner ist, als die Form. 3) Läßt man in einem Gefäße Wasser, das gegen den Luftzug und jede andere Erschütterung geschützt ist, ruhig erkalten, so kann seine Temperatur bis auf 12° unter Null sinken, ohne daß es gefriert. Bei der geringsten Erschütterung aber geht dann die Eisbildung sehr rasch vor sich, und ein hineingehaltenes Thermometer steigt trotz der größeren Kälte der Umgebung bis auf 0°, und behält diese Temperatur bei, bis alles Wasser gefroren ist.

Wir sehen hier, daß tropfbare Flüssigkeiten, wenn ihnen Wärme entzogen wird, und ihre Temperatur bis auf einen gewissen Grad sinkt, in den festen Aggregatzustand übergehen. Der Alkohol ist die einzige tropfbare Flüssigkeit, die, wie schon bemerkt, bei keiner bis jetzt bekannten Kälte fest wird. Aus dem ersten Versuch lernen wir zu gleicher Zeit, daß dieser Uebergang im Allgemeinen bei jedem Körper bei derjenigen Temperatur stattfindet, welche seinem Schmelzpunkte entspricht (334° war der Schmelzpunkt des Bleies). Daß dies jedoch nicht ohne Ausnahme ist, zeigt der dritte Versuch, da der Schmelzpunkt des Eises nicht — 12°, sondern 0° ist. Da aber das Gefrieren bei der geringsten Erschütterung erfolgt, so scheinen die Molecüle oft erst eine Bewegung erhalten zu müssen, welche sie befähigt, diejenige gegenseitige Lage zu einander anzunehmen, welche zu dem festen Zustande gehört. Von einem tropfbar flüssigen Körper, welcher durch Entziehung von Wärme zu einem festen Körper wird, sagt man, er *erstarre*, *gestehe* oder *gefriere*, und die Temperatur, bei welcher dies geschieht, heißt seine *Erstarrungstemperatur*, sein *Gefrierpunkt* oder *Frostpunkt*.

Aus der ersten Erfahrung, welche unter 2 aufgeführt ist, geht hervor, daß Wasser im festen Zustande eine geringere Dichtigkeit hat, und also auch specifisch leichter ist, als im flüssigen Zustande. Deßhalb schwimmt auch das Eis auf dem Wasser. Es ist dies jedoch keine Eigenthümlichkeit des Wassers, sondern auch noch andere Körper zeigen ähnliche Erscheinungen. So namentlich Wismuth, Antimon, Schwefel und einige andere. Von dieser Eigenschaft des Wismuth und Antimon kann man eine Anwendung machen, um sich auf leichte Weise Stängelchen aus diesen Metallen, wie sie oft zu thermoelectrischen Apparaten gebraucht werden, von beliebiger Dicke anzufertigen. Man nimmt nämlich eine Glasröhre, deren innerer Durchmesser der Dicke der anzufertigenden Stängelchen entspricht, taucht das eine Ende in das geschmolzene Metall, und saugt an dem anderen

Digitized by Google

die Luft aus, so wird durch den äußeren Luftdruck die geschmolzene Masse in die Röhre hineingedrückt. Wenn das Metall erstarrt, und sich ausdehnt, so erfolgt die Ausdehnung mit solcher Kraft, daß die Glasröhre zersprengt wird, wodurch die gebildeten Stängelchen auch wieder leicht von dem Glase befreit werden können.

Aus der Erfahrung, welche oben von dem Messing angeführt ist, geht hervor, daß es aber auch Körper gibt, welche grade ein entgegengesetztes Verhalten zeigen, welche also bei dem Erstarren ein kleineres Volumen einnehmen, dichter und specifisch schwerer werden. Auch hier ist Messing nicht der einzige Körper, sondern theilt diese Eigenschaft mit vielen Metallen. Die genaue Kenntniß der Größe dieser Volumensverminderung, welche man das Schwindmaß nennt, ist natürlich für Gießereien durchaus nothwendig, weßhalb man auch das Schwindmaß für verschiedene Metalle zu ermitteln gesucht hat. So beträgt es für das Messing $\frac{1}{80}$ bis $\frac{1}{85}$, d. h. beim Erstarren des geschmolzenen Messings zieht sich dasselbe um $\frac{1}{80}$ seiner Längenausdehnung zusammen.

Da wir gesehen haben, daß bei dem Schmelzen eine große Menge Wärme gebunden wird, von welcher wir nur annehmen können, daß sie für das Bestehen des Körpers im tropfbar flüssigen Zustande unentbehrlich ist, so sollte man vermuthen, daß diese gebundene Wärme beim Erstarren ihrer ganzen Menge nach wieder frei würde, daß also die Temperatur des Körpers selbst und seiner Umgebung stiege. Von einer solchen Erhöhung der Temperatur wird aber in der Regel Nichts beobachtet. Auf der anderen Seite ist es aber auch auffallend, daß eine Flüssigkeit, wenn sie die Erstarrungstemperatur erreicht hat, doch in der Regel nicht gleichzeitig durch ihre ganze Masse erstarrt, sondern nur nach und nach. Beide Erscheinungen dürften sich aber durch die Annahme erklären, daß bei dem Erstarren eines Theilchens dieses wirklich seine gebundene Wärme abgibt, welche sich dann den benachbarten Theilchen mittheilt, und dieselben dadurch noch einige Zeit flüssig erhält. Der letzte Theil des dritten Versuchs zeigt denn auch durch das Steigen des Thermometers bis auf 0° ganz deutlich das Freiwerden der gebundenen Wärme. Es läßt sich dasselbe noch auffallender durch folgenden Versuch nachweisen. In einem Kochfläschchen löse man in der Siedhitze 3 Theile Glaubersalz in 2 Theilen Wasser auf, verschließe dann das Fläschchen mit einem Korke, und stelle es ruhig zum Erkalten hin. Wenn es vor Erschütterungen bewahrt wird, so bleibt doch alles Glaubersalz, trotzdem daß die Lösung übersättigt ist, aufgelöst. Bei der geringsten Erschütterung aber, sei es durch Abnahme des Korks oder durch Einwerfen eines kleinen Stückchens Glaubersalz oder auf irgend eine andere Weise, erfolgt sofort eine Krystallisation, welche, von der Oberfläche beginnend, schnell durch die ganze Masse fortschreitet, so daß der ganze Inhalt zu einem einzigen großen Krystall-Conglomerate wird. Hierbei wird so viel Wärme frei, daß sie sich sogar bei dem Anfassen des Glases durch das Gefühl erkennen läßt, und daß ein eingetauchtes Thermometer oft um 12 Grade steigt. Nach Böttger (Beiträge zur Physik und Chemie, 3. Heft, p. 83) ist die bei dem plötzlichen Krystallisiren von unterschwefligsaurem Natron frei werdende Wärme noch bedeutender, als beim Glaubersalz, und hat derselbe ein Steigen des Thermometers um 20 Grade beobachtet. Aber auch dann, wenn ein tropfbar flüssiger Körper dadurch

Digitized by Google

fest wird, daß er sich mit einem anderen festen Körper verbindet, muß er seine gebundene Wärme abgeben, wie die große Temperaturerhöhung zeigt, die entsteht, wenn man gebrannten Kalk mit Wasser übergießt, wodurch Kalkhydrat gebildet wird.

Eine auffallende Erscheinung beobachtete Rudberg bei dem Erstarren gewisser Metallegirungen. Er fand nämlich, daß bei dem Erkalten dieser Legirungen, ehe sie erstarren, ein Moment eintritt, wo ihre Temperatur eine Zeitlang sich gleich bleibt, daß dann die Temperatur derselben wieder weiter sinkt, bis sie wirklich erstarren, wo dann die Temperatur, grade wie bei den übrigen Körpern, abermals stationär bleibt, bis die ganze Masse erstarrt ist. Die Erstarrung erfolgte immer bei derselben Temperatur, wenn auch in der Legirung die Metalle in verschiedenem Verhältniß gemischt waren, während die zuerst erwähnte Erscheinung bei verschiedenen Wärmegraden eintrat, je nachdem das Verhältniß der Bestandtheile geändert wurde. So erstarrt jede Legirung aus Zinn und Blei bei 187°. Besteht aber eine Legirung aus diesen beiden Metallen aus 3 Theilen Blei und 1 Theile Zinn, so macht die Erkaltung schon bei 280° zum ersten Male einen Stillstand; besteht sie aus 1 Theile Blei und 2 Theilen Zinn, so geschieht dies erst bei 200°.

§. 310. **Das Sieden.** 1) Wird Wasser in einem offenen Gefäße über Feuer gebracht, so entstehen Strömungen in demselben, indem die Theilchen, welche mit den heißen Gefäßwänden in Berührung sind, in die Höhe steigen, und andere niedersinken, wie man sich leicht überzeugen kann, wenn dem Wasser ein in demselben schwebender pulverförmiger Körper (z. B. gepulverter Bernstein) beigemengt wird. Die Temperatur steigt, zugleich sieht man kleine Bläschen sich erheben, sich an die Gefäßwände ansetzen, und von hier nach und nach bis an die Oberfläche steigen. Bei weiterer Erwärmung sieht man größere Blasen von dem Boden aufsteigen, beim Aufsteigen aber immer kleiner werden, und, ehe sie die Oberfläche erreicht haben, ganz verschwinden. Während dieses Vorgangs hört man ein eigenthümliches Geräusch, das das Simmern oder Singen genannt wird. Ist die Erwärmung bis auf 100° gestiegen, so verschwinden die Blasen nicht mehr, sondern steigen bis zur Oberfläche, und setzen dieselbe in eine lebhafte Bewegung. Nun steigt die Temperatur nicht weiter, wenn auch die Erhitzung fortgesetzt wird, aber das Wasser nimmt an Masse immer mehr ab, und Dampf steigt aus dem Gefäße in die Höhe. 2) Wird der Versuch auf hohen Bergen angestellt, so bleibt der Vorgang ganz derselbe, nur mit dem einzigen Unterschiede, daß das Wasser sich nicht bis zu 100°, sondern nur bis zu einem nach der Höhe des Berges verschiedenen, tieferen Wärmegrad erhitzen läßt. 3) Stellt man bei gewöhnlicher Temperatur ein Glas mit Wasser unter den Recipienten der Luftpumpe, und pumpt die Luft aus, so sieht man, wenn die Verdünnung der Luft einen gewissen Grad erreicht hat, die beschriebene wallende Bewegung des Wassers eintreten. In dem Pulshammer, einer luftleeren, gläsernen Röhre, welche zum Theil mit Wasser oder Spiritus angefüllt ist, geräth die Flüssigkeit schon in dieses Wallen, wenn man sie nur fest mit der Hand umschließt. 4) In einem verschlossenen Gefäße, aus welchem die gebildeten Dämpfe nicht entweichen können, kann dagegen das Wasser bis zu einer viel höheren Temperatur erwärmt werden. 5) Wird der Versuch in einem offenen Ge-

Digitized by Google

fäße von beträchtlicher Höhe angestellt, so zeigen nur die der Oberfläche nächsten Wassertheilchen eine Temperatur von 100°, je tiefer dieselben dagegen unter der Oberfläche liegen, desto höher wird ihre Temperatur gefunden. 6) Setzt man ein Platinschälchen über eine Spirituslampe mit doppeltem Luftzug, und erhitzt es, bis es hellroth glüht, läßt dann vermittelst einer Pipette einige Wassertropfen auf die glühende Metallfläche fallen, so nimmt das Wasser eine kugelförmige Gestalt an, und geräth in eine starke rotirende Bewegung. Böttger hat dabei beobachtet, daß der rotirende Wassertropfen unter gewissen Bedingungen die mannichfaltigsten, aber bestimmtesten Formen anzunehmen im Stande sei. Läßt man aber die Platinschale sich abkühlen, so tritt ein Moment ein, in welchem das Wasser in heftiges Sieden geräth, und nach allen Seiten umhergeschleudert wird.

Wir sehen hier, daß auch die tropfbar flüssigen Körper durch Einwirkung der Wärme ihren Aggregatzustand verändern, daß sie ausdehnsam flüssig oder luftförmig werden. Diesen Uebergang bezeichnet man mit dem Namen Sieden oder Kochen. Betrachten wir den Vorgang in dem ersten Versuch etwas näher, so werden die beobachteten Strömungen offenbar dadurch hervorgerufen, daß die der heißen Gefäßwand nächsten Theile durch diese erwärmt, dadurch ausgedehnt und specifisch leichter werden, also sich nach der Oberfläche erheben müssen, während die an der Oberfläche befindlichen kälteren Theile als specifisch schwerer zu Boden sinken, hier dann selbst eine höhere Temperatur annehmen, und dann ebenfalls wieder aufsteigen. Die kleinen Bläschen, die sich zuerst in der Flüssigkeit und an den Wänden des Gefäßes zeigen, sind Luftbläschen. Wir haben nämlich schon in dem ersten Abschnitte gesehen, daß auch das Wasser porös ist, und daß die Poren desselben mit Luft erfüllt sind, und daß die Luft auch an den Oberflächen der festen Körper adhärirt. Durch die viel stärkere Ausdehnung der Luft im Vergleich zu derjenigen des Wassers können die Poren die in ihnen enthaltene Luft nicht mehr fassen, und sie steigt deßhalb als der specifisch leichtere Körper in kleinen Bläschen in die Höhe. Zugleich wirkt aber auch die Wärme der Adhäsion der Luft an den Gefäßwänden entgegen, indem sie die Ausdehnsamkeit der Lufttheilchen vergrößert, und hebt sie bei einem gewissen Grade dieser Gegenwirkung gänzlich auf. Die dann folgenden größeren Blasen sind bereits Wasserdampfblasen. Daß sie aber bei ihrem Aufsteigen an Volumen abnehmen, und ganz verschwinden, ehe sie die Oberfläche erreichen, rührt daher, daß noch nicht die ganze Wassermasse gleichmäßig erwärmt ist, und daß, während die untersten Schichten bereits die zur Dampfbildung nothwendige Temperatur besitzen, die Temperatur nach der Oberfläche zu immer mehr abnimmt. Die Flüssigkeit dringt deßwegen in den Raum dieser Dampfbläschen ein, und bringt grade dadurch das s. g. Singen hervor. Sobald aber die ganze Masse eine gleichmäßige Temperatur erlangt hat, fällt dieser Grund weg, die Blasen bilden sich nun in der ganzen Masse, und steigen mit dem Wasser auf. Was man aus dem Gefäße aufsteigen sieht, und im gewöhnlichen Leben als Wasserdampf bezeichnet, ist aber keineswegs das gebildete gasförmige Wasser, da dieses vollkommen durchsichtig und deßhalb unsichtbar ist, sondern es sind, wie später noch erhellen wird, Luftbläschen von einer dünnen Hülle tropfbar flüssigen Wassers umgeben, das sich aus dem aufsteigenden Dampfe bildet. Daß das Sieden wieder nur bei einer ganz

Digitized by Google

bestimmten Temperatur eintritt, zeigt, daß die Molecüle erst durch die Ausdehnung in eine gewisse Entfernung von einander gebracht sein müssen, ehe die abstoßende Moleculakraft dasjenige Uebergewicht über die anziehende erhält, welches dem Körper das Bestehen im ausdehnsam flüssigen Zustande möglich macht. Diese Temperatur nennt man den Siedepunkt, und er ist für die verschiedenen tropfbaren Flüssigkeiten nach der Erfahrung eben so verschieden, wie der Schmelzpunkt für die festen Körper. So siedet Schwefeläther schon bei 35°, Quecksilber dagegen erst bei 360°. Aus dem Umstande, daß, sobald das Sieden seinen Anfang genommen hat, die Temperatur nicht mehr steigt, bis alle tropfbare Flüssigkeit in Dampf verwandelt ist, mag auch noch so viele Wärme zugeführt werden, ergibt sich, daß hier wieder alle Wärme zur Dampfbildung verwandt, also gebunden oder latent wird, und demnach nur eine Beschleunigung des Processes hervorrufen kann.

Ein wesentlicher Unterschied von dem Schmelzen ergibt sich jedoch aus der in 2 angeführten Erfahrung. Während das Schmelzen aller Orten bei derselben Temperatur erfolgt, sehen wir das Sieden bei einer desto niedrigeren Temperatur eintreten, an einem je höheren Orte die Erwärmung der Flüssigkeit vorgenommen wird. Nun kann aber kein Dampf aus einer Flüssigkeit sich erheben, wenn er nicht im Stande ist, den auf der Flüssigkeit ruhenden Druck der atmosphärischen Luft zu überwältigen. Da dieser Druck aber offenbar von der Höhe der Luftsäule abhängt, diese jedoch desto kleiner ist, je höher ein Ort über der Oberfläche des Meeres liegt, so erklärt sich das Sieden bei niedrigerer Temperatur auf hohen Bergen einfach aus einer Verminderung des Luftdrucks. In dem Hospiz auf dem St. Bernhard siedet das Wasser schon bei 92½°, auf dem Montblanc selbst schon bei 86½°. Hieraus erhellet auch die Möglichkeit, aus dem Siedpunkte des Wassers an einem Orte die Höhe desselben über der Oberfläche des Meeres zu finden. Die in 3 aufgeführten Versuche haben in dem Gesagten ihre Erklärung mit gefunden. Auch der folgende nette Versuch gehört hierher. Man bringe in einem etwa zur Hälfte gefüllten Kochfläschchen Wasser zum Sieden. Nachdem dieses einige Zeit angehalten hat, nehme man das Fläschchen von der Flamme, und verschließe es mit einem Korke, so wird in ganz kurzer Zeit das Sieden aufhören. Dreht man dann das Fläschchen um, so fängt das Wasser von Neuem an, wieder eine ziemliche Zeit lang zu sieden. Wenn es dann zum zweiten Male aufhört, und man begießt den oberen Theil mit kaltem Wasser, so findet abermals eine heftige Aufwallung des Wassers statt. Beim Umkehren nämlich kommen die über dem Wasser stehenden Dämpfe mit diesem, das schon nicht mehr die Siedetemperatur besitzt, in Berührung, und können sich nicht mehr in Dampfgestalt erhalten; dagegen ist der jetzt nach Oben gekehrte Raum sowohl luft-, als dampfleer, und das Wasser kann demnach, da kein Druck auf ihm ruht, auch bei der niedrigeren Temperatur wieder anfangen zu sieden. Dadurch füllt sich nach und nach dieser Raum mit Dämpfen an, die dann durch ihren immer größer werdenden Druck dem Sieden immer mehr entgegenwirken, bis es endlich ganz aufhört. Durch das kalte Wasser aber werden die gesammelten Dämpfe so abgekühlt, daß sie die Dampfgestalt nicht behaupten können, es entsteht abermals ein leerer Raum, so daß das Sieden noch einmal beginnen kann.

Digitized by Google

Da nun der Siedepunkt sich mit dem Luftdruck ändert, so muß, wie schon oben bemerkt wurde, bei Anfertigung genauer Thermometer auch auf den Barometerstand Rücksicht genommen werden, indem sonst 2 auch noch so sorgfältig, aber bei verschiedenem Barometerstande angefertigte Thermometer in ihren Angaben nicht übereinstimmen können. Nur bei 28 Zoll Barometerstand ist der Siedepunkt 100°, dagegen bei 27 Zoll um 1° niedriger, und bei 29 Zoll um 1° höher, als bei 28 Zoll. Es muß demnach, wenn der Siedepunkt bei einem Barometerstande von 27 Zoll bestimmt wurde, der Fundamentalstand nur in 99 gleiche Theile getheilt, dann noch ein weiterer solcher Theil hinzugefügt, und dieser dann erst mit 100 und als Siedepunkt bezeichnet werden.

Wird dagegen die Erwärmung in einem verschlossenen Gefäße vorgenommen, so daß die zuerst gebildeten Dämpfe nicht entweichen können, so vermehren sie vermöge ihrer Ausdehnsamkeit den Druck auf die Oberfläche des Wassers, und zwar in desto erhöhterem Grade, je mehr Dämpfe sich über demselben ansammeln. Dadurch wird aber der Siedepunkt immer höher hinauf gerückt, da die Ausdehnsamkeit der sich bildenden Dämpfe immer größer werden muß, um den immer größer werdenden Druck überwältigen zu können. Die Flüssigkeit kann demnach gar nicht in ein allgemeines Sieden gelangen. Darauf beruht der im 17. Jahrhunderte von Papin erfundene und nach ihm benannte Topf. Es ist dies ein fest verschließbares Metallgefäß, dessen Wände einen hohen Druck auszuhalten vermögen, und in dessen Deckel noch außerdem ein Ventil angebracht ist, das sich, wenn der Druck der Dämpfe zu groß wird, so daß ein Zersprengen des Gefäßes zu besorgen stünde, öffnet, und dem Dampfe einen Ausweg gestattet. Er wird benutzt, um Substanzen, wie Knorpel, Knochen u. s. w. zu erweichen und auszuziehen, die sich durch Wasser von der gewöhnlichen Siedhitze nicht erweichen lassen.

Daß in einem hohen und offenen Gefäße nur die oberen Flüssigkeitstheilchen eine Temperatur von 100°, die tieferliegenden dagegen eine höhere Temperatur zeigen, kann nicht auffallen, wenn man bedenkt, daß die Dämpfe, welche sich am Boden des Gefäßes bilden wollen, nicht nur den Luftdruck, sondern noch außerdem auch den Druck des über ihnen stehenden Wassers überwältigen müssen, wenn sie in die Höhe steigen wollen, und daß der letztere um so bedeutender wird, je höher das Niveau über dem Boden sich befindet. Wegen dieser verschiedenen Temperatur in verschiedenen Schichten von siedendem Wasser senkt man ein Thermometer bei Bestimmung seines Siedepunktes auch nicht in das Wasser selbst ein, sondern bringt es in die unmittelbar aus dem Wasser aufsteigenden Wasserdämpfe, deren Temperatur bei gleichem Luftdrucke stets gleich ist.

Die zuletzt erwähnte Erscheinung wurde zuerst im Jahre 1756 von Leidenfrost beobachtet, und nach ihm das Leidenfrost'sche Phänomen genannt. Zur Erklärung desselben nimmt man an, daß zwischen den Theilchen des Wassers und des glühenden Metalls eine innige Berührung durch eine Schicht von Dämpfen, welche sich gebildet habe, verhindert werde, so daß sich die Wärme des glühenden Metalles nicht in hinreichendem Maße dem Wasser mittheilen könne, um dasselbe in's Kochen zu versetzen. Diese Ansicht wird wesentlich dadurch unterstützt, daß nach genauen Versuchen das Wasser wirklich eine niedrigere Temperatur als 100° besitzt. Die ro-

Digitized by Google

tirende Bewegung soll daher kommen, daß die kleinen Tropfen durch die an allen Punkten ihrer Oberfläche entwickelten Dämpfe abwechselnd in die Höhe gerissen werden, und wieder niederfallen. Auf ganz ähnliche Weise erklärt man auch die erst in neuester Zeit wieder durch Boutigny und Andere bestätigte Erfahrung, daß man, ohne sich zu verletzen, einige Zeit die Hand in geschmolzenes Metall tauchen kann. Der aus den Poren der Haut wegen der Hitze reichlich austretende Schweiß verdampft, und umgibt dadurch die Hand mit einer schützenden Dampfschichte.

§. 311. **Das Verdunsten.** 1) Läßt man Wasser in einem offenen Gefäße längere Zeit bei der gewöhnlichen Temperatur stehen, so findet man, daß sich die Menge desselben immer mehr vermindert, bis endlich alles Wasser ganz verschwunden ist. Macht man den Versuch mit einer anderen tropfbaren Flüssigkeit, so macht sich nur insofern ein Unterschied bemerklich, daß die Zeit, in welcher die Flüssigkeit aus dem Gefäße verschwindet, verschieden groß ist. Schwefeläther z. B. verschwindet viel schneller, Quecksilber viel langsamer, als das Wasser. 2) Wenn im Winter Schnee fällt, der bei kaltem Wetter lange liegen bleibt, so sieht man nach und nach die Höhe desselben auf den Feldern abnehmen. Feste Körper, die zu den riechenden Substanzen gehören, wie Moschus u. a., verbreiten fortdauernd auf größere oder geringere Entfernung einen ihnen eigenthümlichen Geruch; selbst in Metalllagern, z. B. in Zinnlagern, macht sich, wenn auch in geringem Grade, ein nach der materiellen Beschaffenheit des Metalles verschiedener schwacher Geruch bemerkbar. 3) Umwickelt man die Kugel eines Thermometers mit Mousselin, und benetzt denselben mit Wasser, so sieht man das Thermometer nach und nach um mehrere Grade fallen. Benetzt man den Mousselin mit Schwefeläther, so ist das Sinken des Thermometers noch bedeutender. 4) Stellt man ein Schälchen mit Wasser unter den Recipienten der Luftpumpe, und pumpt die Luft aus, so geschieht die Abnahme des Wassers viel rascher, als in freier Luft. 5) Man nehme 2 Uhrgläser von verschiedener Krümmung, in das flachere gieße man etwas Wasser, setze in dasselbe das stärker gekrümmte, in welches man Schwefeläther gegossen hat, bringe sie unter den Recipienten der Luftpumpe, und verdünne die Luft rasch, so wird das Wasser gefrieren. 6) Der Kryophor (τὸ κρύος die Eiskälte, und φορός tragend) besteht aus 2 hohlen, luftleeren Glaskugeln, welche durch eine ziemlich lange Glasröhre mit einander verbunden sind. Die eine Kugel ist etwa zur Hälfte mit Wasser gefüllt. Wird nun die leere Kugel in eine Kältemischung eingesenkt, so fängt das Wasser in der anderen Kugel an zu gefrieren.

Wenn wir eine tropfbare Flüssigkeit in einem offenen Gefäße immer mehr abnehmen sehen, so entsteht zunächst die Frage, wohin denn das Verschwundene gekommen sei, und es bietet sich uns keine andere mögliche Erklärung dar, als die Annahme, daß der verschwundene Theil Gasgestalt angenommen habe. Da nun die Erscheinung bei jeder Temperatur beobachtet wird, so ersehen wir also, daß nicht grade die Siedetemperatur erfordert wird, um eine tropfbare Flüssigkeit in den ausdehnsam flüssigen Aggregatzustand überzuführen. Der Vorgang selbst ist aber auch noch von dem des Siedens insofern verschieden, als wir nie ein Aufsteigen von Blasen in der Flüssigkeit beobachten. Aus diesem Umstande müssen wir folgern, daß es nur die an der Oberfläche liegenden Theilchen sein können,

Digitized by Google

welche ausdehnsam flüssig werden. Zum Unterschiede von dem Verdampfen nennt man daher dieses Ausdehnsamflüssigwerden, welches bei jeder Temperatur erfolgt, und sich immer nur auf die Oberfläche beschränkt, das Verdunsten. Bei dem Verdampfen war stets eine bestimmte Temperatur erforderlich, um den im Innern der Flüssigkeit gebildeten Dämpfen eine hinlängliche Spannkraft zu ertheilen, durch welche sie den auf ihnen lastenden Druck, der ihrem Aufsteigen entgegenwirkte, zu bewältigen, und sich bis zur Luft zu erheben, bei dem Verdunsten dagegen sind die sich bildenden Dünste bereits mit der Luft in Berührung, und können sich mit derselben mengen; für sie ist daher auch gar kein bestimmter Grad von Spannkraft erforderlich, und daraus erklärt es sich denn, warum sie sich bei jedem beliebigen Wärmegrad bilden. Wenn Schwefeläther rascher, Quecksilber dagegen langsamer verdunstet, als Wasser, so wird man, da der Siedepunkt des ersteren tiefer, und der des letzteren viel höher liegt, als der Siedepunkt des Wassers, auf die Vermuthung geführt, daß Flüssigkeiten desto leichter verdunsten, je tiefer ihr Siedepunkt liegt, und in der That wird diese Vermuthung vollständig durch die Erfahrung bestätigt.

Aus 2 lernen wir, daß auch feste Körper, selbst ohne daß sie vorher durch Schmelzen tropfbar flüssig geworden sind, in den ausdehnsam flüssigen Aggregatzustand übergehen können. In 3 kann das Sinken des Thermometers nicht von dem Wasser herrühren, denn es geht das Quecksilber, wenn man auch Wasser, dessen Temperatur genau mit der von dem Thermometer angegebenen übereinstimmt, anwendet, doch immer ganz auf gleiche Weise zurück. Aber das Wasser, dem durch den Mousselin viel Oberfläche gegeben ist, verdunstet, und zwar, weil verhältnißmäßig viele Theile mit der Luft in Berührung stehen, etwas rasch. Da nun während dieses Actes das Thermometer sinkt, so folgt daraus, daß die Verdunstung, ungeachtet sie bei jeder Temperatur stattfindet, doch nur bei einer bestimmten Menge von Wärme erfolgen kann, und daß die verdunstenden Theilchen der Flüssigkeit die Wärme, welche sie bei dem Wechsel ihres Aggregatzustandes binden, ihrer nächsten Umgebung entziehen. Daß diese Temperaturerniedrigung der Umgebung, welche man die Verdunstungskälte nennt, desto beträchtlicher sein muß, je mehr Theilchen in einer bestimmten Zeit verdunsten, ist klar, und es erklärt sich hieraus, warum ein viel stärkeres Sinken des Thermometers eintritt, wenn man den Mousselin mit Schwefeläther befeuchtet.

Wie das Sieden in der verdünnten Luft des Recipienten der Luftpumpe sehr befördert wurde, so sehen wir dasselbe hier auch bei dem Verdunsten. Es ist zwar oben bemerkt, daß die verdunstenden Theilchen, weil sie schon mit der Luft in Berührung stünden, nicht erst den Luftdruck zu überwinden hätten, um sich mit der Luft zu mengen. Grade aber, wie eine tropfbare Flüssigkeit von einem festen Körper, welchen sie auflöst, bei einer gegebenen Temperatur nur eine ganz bestimmte Quantität in sich aufnehmen kann, grade so ist es auch mit der Luft in Beziehung auf die Dämpfe oder Dünste einer tropfbaren Flüssigkeit, und wie im ersteren Falle die Flüssigkeit, so heißt auch in dem letzteren die Luft alsdann gesättigt. Nun kann aber recht wohl die nächste Luftschicht gesättigt sein, während

Digitized by Google

die darüber liegenden noch weit von dem Sättigungspunkte entfernt sind. Sollen sich daher Dünste auch bis zu diesen erheben, so müssen sie im Stande sein, den auf ihnen lastenden Druck zu überwinden, und sie werden dies um so leichter vermögen, je geringer eben dieser Druck, und je verdünnter also die Luft ist. Man kann aber auch die weitere Verdunstung noch dadurch ermöglichen, daß man die gesättigte Luftschicht entfernt, und die verdunstende Flüssigkeit mit immer neuen, noch nicht gesättigten Schichten in Berührung bringt, und hierin liegt der Grund, warum nach der Erfahrung bei bewegter Luft die Verdunstung weit rascher vor sich geht, als wenn die Luft ruhig ist, und warum auch im dritten Versuch das Sinken des Thermometers rascher erfolgt, wenn man dasselbe hin und her schwingt.

Die Erklärung der beiden letzten Versuche wird nun auch keine Schwierigkeit mehr darbieten. Die an sich schon leichte Verdunstung des Schwefeläthers wird durch die Verdünnung der Luft noch sehr bedeutend erhöht, und dadurch wächst denn auch, wie schon oben bemerkt, die Verdunstungskälte, so daß das Wasser bis zu seinem Gefrierpunkte abgekühlt wird. Im Kryophor müssen wir uns den anscheinend leeren Raum mit Wasserdünsten angefüllt denken. Wird die leere Kugel in eine Kältemischung gebracht, so wird diesen Dünsten so viel Wärme entzogen, daß sie wieder in den tropfbar flüssigen Zustand zurückkehren. Dadurch aber wird ein relativ leerer Raum gebildet, weßhalb die Verdunstung des Wassers in der anderen Kugel sehr rasch erfolgt, um diesen Raum wieder auszufüllen. Die dazu nöthige Wärme wird zunächst dem Wasser selbst entzogen, und dieses auf solche Weise zum Gefrieren gebracht. Durch die Verdunstungskälte lassen sich auch noch viele andere bekannte Erfahrungen erklären, z. B. warum man, wenn man aus dem Bade steigt, ein Gefühl von Kälte empfindet, warum die Temperatur des menschlichen Körpers in der Hitze des Sommers nicht größer ist, als in der Kälte des Winters (der gebildete Schweiß verdunstet, und bringt dadurch eine Abkühlung hervor), wie Menschen in einem stark erhitzten Raume einige Zeit leben können (Solander, Banks und Blagden blieben 8 Minuten lang in einem bis auf 127° geheizten Locale), warum nach einem Regen gewöhnlich die Temperatur der Luft fällt, warum man im Sommer die Fäßer mit nassen Tüchern bedeckt, um die darin befindlichen Getränke kühl zu erhalten (Alkarazza's in Spanien) u. a.

§. 312. **Das Condensiren.** Schon im ersten Abschnitte §. 28. ist gezeigt worden, daß die ausdehnsam flüssigen Körper, sowohl Dämpfe wie Gase, durch Abkühlung oder durch Druck oder durch gleichzeitige Einwirkung beider tropfbar flüssig gemacht werden können. Man nennt diesen Wechsel des Aggregatzustandes die Condensation (condensare verdichten), weil die Molecüle des Körpers hierbei einander viel näher gebracht werden. Wie aber beim Erstarren die bei dem Schmelzen gebundene Wärme wieder frei wird, so steht zu vermuthen, daß auch bei der Condensation die bei der Bildung der Dämpfe und Dünste gebundene Wärme aus dem Körper wieder ausgeschieden werde. Und in der That ist es auch so, denn wenn man über kochendes Wasser eine kalte Glasscheibe oder Metallplatte hält, so setzen sich nicht nur Wassertröpfchen an derselben an, sondern das Glas oder das Metall erhitzen sich auch. Man hat hiervon

Digitized by Google

eine Anwendung zur Heizung größerer Räume (Säle, Theater, ja ganzer Gebäude) gemacht. Zu diesem Zwecke wird Wasser in einem Theile des Gebäudes, der unter den zu heizenden Räumen liegt, verdampft, und die gebildeten Dämpfe nach diesen Räumen in eisernen Röhren, welche längs des Fußbodens gelegt werden, fortgeleitet. Der Dampf verdichtet sich nun auf seinem Wege durch diese Röhren zu Wasser, und entbindet dadurch eine große Menge Wärme, welche in Verbindung mit der freien Wärme des Dampfes die Heizung bewirkt. Die Röhren müssen eine geneigte Lage haben, damit das gebildete Wasser immer wieder in den Kessel zurückfließen, und hier von Neuem verdampft werden kann.

Eine andere Anwendung, welche man von der Condensation der Dämpfe macht, ist die Destillation (destillare abtröpfeln). Sie besteht darin, daß man in einem verschlossenen Gefäße eine Flüssigkeit erhitzt, und die sich bildenden Dämpfe nach einem kühleren Orte leitet, wo sie ihre Wärme absetzen, und tropfbar flüssig werden. Man bedient sich der Destillation, wenn eine Flüssigkeit verschiedene Bestandtheile enthält, und diese von einander getrennt werden sollen. Nothwendig ist aber, daß die Bestandtheile einen verschiedenen Siedepunkt haben. So befreit man durch Destillation das gewöhnliche Wasser von den Salzen und Erden, die es immer aufgelöst enthält, so wird der Weingeist, der bei seiner Fabrication stets noch viel Wasser enthält, von diesem mehr oder weniger getrennt.

Drittes Kapitel.

Von der Wirkung der Wärme auf ausdehnsame Flüssigkeiten.

§. 313. **Einwirkung der Wärme auf die Gase.** 1) Nimmt man ein Barometer, dessen offenes Ende sich luftdicht verschließen läßt, so daß die über dem Quecksilber im offenen Schenkel befindliche Luft von der äußeren Luft abgesperrt werden kann, so behält das Quecksilber doch, wenn die Abschließung erfolgt, seinen Stand. 2) Erwärmt man dann oder erkältet die abgesperrte Luft, so steigt oder sinkt sogleich das Quecksilber in der Röhre.

Früher haben wir gezeigt, daß die Höhe der Quecksilbersäule in dem Barometer die Größe des Luftdrucks, also das Gewicht der auf dem Quecksilber ruhenden, und bis zu dem Ende der Atmosphäre reichenden Luftsäule messe (§. 29 und 30). Wenn nun die Luft in dem offenen Schenkel von der äußeren Luft abgesperrt wird, so kann unmöglich das Gewicht der ganzen Luftsäule auf dem Quecksilber ruhen, das Gewicht der eingeschlossenen Luft aber ebenso unmöglich der ganzen Quecksilbersäule das Gleichgewicht halten. Aus der Ausdehnsamkeit der Luft folgt aber, daß sie auf Alles, was sie an ihrem Bestreben, einen immer größeren Raum einzunehmen, hindert, einen Druck ausüben muß. Die Größe dieses Druckes bestimmt ihre Spannkraft oder Expansivkraft. Je größer nun der Druck ist, der auf der Luft ruht, desto größer ist natürlich ihre Zusammendrückung, und in Folge davon ihre Spannkraft. Da nun die eingeschlossene Luft in demselben Zustande der Zusammendrückung sich be-

Digitized by Google

findet, wie alle übrige Luft an der Oberfläche der Erde, so wird also die Queckſilberſäule durch die Spannkraft der eingeſchloſſenen Luft in der Höhe erhalten, und iſt demnach auch ein Maß für dieſe Spannkraft. Wenn wir nun das Queckſilber bei der Erwärmung der eingeſchloſſenen Luft ſteigen ſehen, ſo folgt daraus, daß durch die Wärme die Spannkraft vermehrt wird. In einen höheren Aggregatzuſtand können die luftförmigen Körper durch die Wärme nicht übergeführt werden, weil es keinen ſolchen gibt, aber dieſe Vermehrung der Spannkraft iſt bei denſelben offenbar ganz dieſelbe Wirkung, wie bei den anderen Körpern die Veränderung des Aggregatzuſtandes, und beide, Vermehrung der Spannkraft und Veränderung des Aggregatzuſtandes, nur unmittelbare Folgen von der Ausdehnung durch die Wärme. Denn wenn die Luft bei der Erwärmung ſich nicht ausdehnen kann, weil ſie in einem Raume abgeſperrt iſt, und weil die ſperrenden Wände ihre Ausdehnung unmöglich machen, ſo muß ſie doch wenigſtens ihr Beſtreben, ſich auszudehnen, dadurch beurkunden, daß ſie auf die ſperrenden Wände einen größeren Druck ausübt, d. h. durch eine größere Spannkraft. Wie ſich hier die Luft in Beziehung zu der Wärme verhält, ebenſo verhalten ſich natürlich auch alle anderen Gaſe.

§. 314. **Einwirkung der Wärme auf den Waſſerdampf.** 1) In eine mit Queckſilber gefüllte Toricelli'ſche Röhre laſſe man eine kleine Menge Waſſer aufſteigen. Das Queckſilber wird um einen gewiſſen Betrag ſinken. Statt des ziemlich flachen Gefäßes, wie man es gewöhnlich bei dem Toricelli'ſchen Verſuche anwendet, nehme man aber ein viel tieferes, mit Queckſilber gefülltes Gefäß, ſo daß ſich die Röhre bis zu verſchiedenen Tiefen eintauchen läßt. Senkt man nun die Röhre tiefer in das Queckſilber ein, ſo bleibt doch die Höhe der Queckſilberſäule über der Oberfläche des Queckſilbers in dem offenen Gefäß unverändert, und es vermindert ſich nur der Raum über dem Queckſilber in der Röhre. Zugleich ſteht man das Waſſer ſich vermehren. Zieht man die Röhre mehr aus dem Queckſilber heraus, ſo bleibt abermals die Höhe der Queckſilberſäule in der Röhre unverändert, aber das über dem Queckſilber ſtehende Waſſer vermindert ſich. 2) Umgibt man die Toricelli'ſche Röhre mit einem weiteren Gefäße, durch deſſen Boden die Röhre luftdicht hindurchgeht, füllt daſſelbe mit Waſſer von einer höheren Temperatur, ſo beobachtet man ein ſtärkeres Sinken des Queckſilbers, und zwar iſt daſſelbe um ſo ſtärker, je höher die Temperatur des eingegoſſenen Waſſers iſt. Wird ſiedendes Waſſer angewandt, ſo fällt das Queckſilber der Röhre bis zur Oberfläche des Queckſilbers in dem offenen Gefäße.

Es iſt klar, daß im erſten Verſuch das Sinken des Queckſilbers nicht Folge von dem Gewicht der kleinen Menge aufgeſtiegenen Waſſers ſein kann, da es in dieſem Falle nur den 13,6te Theil von der Höhe der kleinen Waſſerſchicht betragen dürfte. Indem aber das Waſſer in die Toricelli'ſche Leere gelangt, nimmt ein Theil deſſelben ſofort Dampfgeſtalt an, und nur die Spannkraft des gebildeten Dampfes kann, wenn wir von dem geringen Gewichte des Waſſers abſehen, das Sinken veranlaßt haben. Es gibt uns alſo hier eine Queckſilberſäule, welche den Unterſchied des grade ſtattfindenden Barometerſtandes und der Höhe der Queckſilberſäule in unſerem Verſuche zur Höhe hat, ein Maß für die Spannkraft der gebildeten Dämpfe an die Hand. Wenn nun bei dem tieferen Einſenken die Höhe

Digitized by Google

der Queckſilberſäule unverändert bleibt, aber der mit Dämpfen erfüllte Raum kleiner wird, und zugleich ein Theil der Dämpfe wieder tropfbar flüſſig wird, wie wir aus der Vermehrung des Waſſers erſehen, ſo lernen wir daraus, daß ſich eine beſtimmte Menge Dampf nicht in jeden beliebigen Raum bringen läßt, ſondern daß die Menge Dampf, welche ein Raum in ſich aufnehmen kann, unter ſonſt gleichen Umſtänden nur von der Größe des Raumes abhängt. Da ſich, wenn die Röhre mehr aus dem Queckſilber herausgezogen wird, das über dem Queckſilber in der Röhre ſtehende Waſſer vermindert, alſo zum Theil Dampfgeſtalt annimmt, ſo geht daraus hervor, daß die Verdampfung einer Flüſſigkeit ſo lange andauert, bis der mit ihr in unmittelbarer Verbindung ſtehende Raum die ganze Menge Dampf, welche er unter den gegebenen Umſtänden zu faſſen vermag, in ſich aufgenommen hat. Iſt dieſer Punkt eingetreten, ſo ſagt man, wie ſchon bemerkt wurde, der Raum ſei mit Dämpfen *geſättigt*, und die Verdampfung hört auf. Daraus aber, daß in beiden Fällen unſeres Verſuchs die Höhe der Queckſilberſäule in der Röhre dieſelbe bleibt, ergibt ſich, daß die Spannkraft des Dampfes nicht von der Menge deſſelben abhängt, wenn ſich nur die größere Menge auch in einen verhältnißmäßig größeren Raum verbreiten kann. Bei dem Sättigungspunkte hat der Dampf alſo auch das Maximum ſeiner Dichte erlangt. Wenn ſich nun gleich, wie wir geſehen haben, die Spannkraft der Dämpfe, ſobald ein Raum mit denſelben geſättigt iſt, nicht nach der Menge der Dämpfe richtet, ſo ſehen wir doch aus 2, daß ſie weſentlich durch die Temperatur derſelben bedingt iſt, und daß ſie mit der Temperatur wächſt. Sie wächſt aber nach den angeſtellten Verſuchen nicht in demſelben Verhältniß wie die Temperatur, ſondern in einem größeren. Aus dem mitgetheilten Verſuche ergibt ſich, *daß die Spannkraft des Waſſerdampfes bei der Temperatur des Siedepunktes des Waſſers ſtets dem Atmoſphärendruck gleich iſt*. Bei einer Temperatur von 121,4° iſt die Spannkraft ſchon 2 mal, bei 135,1° 3 mal, bei 145,4° 4 mal u. ſ. w. ſo groß, als der Atmoſphärendruck. Daß die Verſuche, bei welchen die Temperatur der Dämpfe über 100° geſteigert werden ſoll, nicht auf die in 2 angegebene Weiſe angeſtellt werden können, leuchtet ein. Man nimmt in dieſem Falle ein ſtarkes rundes Gefäß von Eiſen, füllt in daſſelbe erſt Queckſilber, und darüber Waſſer, ſo aber, daß noch ein großer Theil des Gefäßes leer bleibt. Durch den oberen Theil deſſelben geht luft- und dampfdicht eine lange, mit einer Scale verſehene, an beiden Enden offene Glasröhre hindurch, deren unteres Ende bis in das Queckſilber hinabreicht. Außerdem geht durch den oberen Theil auch noch ein Thermometer hindurch, ſo daß die Kugel deſſelben ſich innerhalb des Gefäßes befindet, um die Temperatur der Dämpfe meſſen zu können, und ein Hahn, um durch denſelben zu Anfang der Verdampfung erſt alle atmoſphäriſche Luft entweichen laſſen zu können. Durch untergeſetztes Feuer wird das Waſſer verdampft, und je mehr die Spannkraft der Dämpfe wächſt, deſto höher wird das Queckſilber in die Glasröhre emporgetrieben. Bei der Erwärmung wird man zugleich beobachten, daß das Waſſer immer mehr abnimmt, daß alſo immer neue Mengen von Dampf ſich bilden, und in dem Raume ſich anſammeln. Dadurch muß aber natürlich die Dichte des Dampfes immer größer werden. Während wir alſo bisher durch die Wärme ſtets die Dichte

Digitized by Google

der Körper abnehmen sahen, finden wir hier grade die entgegengesetzte Erscheinung.

Bisher hatten wir angenommen, daß in dem Raume, in welchem sich der Dampf befindet, auch noch Wasser vorhanden sei. Ist dieses nun nicht der Fall, und enthält der Raum nur Dampf, so verhalten sich die Dämpfe grade wie die Gase.

§. 315. **Einwirkung der Wärme auf andere Dämpfe.** 1) Nimmt man in dem ersten Versuche des vorhergehenden Paragraphen statt des Wassers eine andere Flüssigkeit, so bleiben die Erscheinungen im Allgemeinen dieselben, nur ist das Sinken des Queckſilbers bei verschiedenen Flüssigkeiten verschieden. Bei Weingeist z. B. ist es größer, als bei Wasser, und bei Schwefeläther wieder viel größer, als bei Weingeist. 2) Bei Weingeist und Schwefeläther fällt das Queckſilber in der Röhre bei der Erwärmung schon viel früher bis zur Oberfläche des Queckſilbers in dem äußeren Gefäße. als bei Wasser, und zwar immer dann, wenn die Temperatur des erwärmenden Wassers dem Siedepunkt der angewandten Flüssigkeit gleich ist, bei Schwefeläther also schon, wenn das erwärmende Wasser auch nur 35° warm ist.

Aus 1 geht hervor, daß die aus verschiedenen Flüssigkeiten entstandenen Dämpfe unter sonst gleichen Umständen auch eine verschiedene Spannkraft besitzen, und daß die Spannkraft derselben desto größer ist, je niedriger der Siedepunkt der Flüssigkeit liegt. In Folge dessen muß demnach bei den gewöhnlichen Temperaturen die Spannkraft der Queckſilberdämpfe (Queckſilber siedet erst bei 360°) sehr unbedeutend sein, und nach den angestellten Versuchen ist sie es in der That in einem solchen Maße, daß sie bei der Siedetemperatur des Wassers nur etwas über $\frac{1}{10}$ Linie beträgt. Wäre es anders, so könnte, da in dem Barometer auch Queckſilberdämpfe sich in die Toricelli'sche Leere erheben, der Barometerstand nicht als das unmittelbare Maß des grade stattfindenden Luftdrucks angesehen werden, sondern man müßte den beobachteten Barometerstand jedesmal noch um eine Höhe vermehren, welche der Spannkraft der Queckſilberdämpfe in dem Vacuum in dem einzelnen Falle entspräche.

Aus 2 folgt das wichtige Gesetz, daß die Spannkraft der Dämpfe bei der Temperatur des Siedepunktes derjenigen Flüssigkeit, aus welcher sie sich entwickelt haben, stets dem Atmosphärendruck gleich ist.

Im Uebrigen zeigen die Dämpfe anderer Flüssigkeiten ganz entsprechende Erscheinungen mit den Wasserdämpfen. Die Stärke der Spannkraft der Dämpfe zeigt man an den Platzgläschen. Es sind dies kleine Glaskügelchen, welche ein wenig Wasser enthalten. Wird ein solches Kügelchen in den Docht einer Weingeistlampe gesteckt, und dann die Lampe angezündet, so zerspringt das Kügelchen, sobald das Wasser verdampft ist, mit einem heftigen Knall. Auch die Aeolipile, welche man anwendet, um Glas zu schmelzen, gehört hierher. Es ist dies ein metallenes Kesselchen (gewöhnlich von Kugelgestalt), aus welchem eine enge Röhre herausführt. Sobald in demselben eine Flüssigkeit, z. B. Weingeist, verdampft wird, strömt der gebildete Dampf mit großer Heftigkeit aus dem Röhrchen. Wird dann der ausströmende Dampf durch die Flamme einer Lampe geleitet, so wird diese

Digitized by Google

dadurch bedeutend verstärkt, und so ein viel größerer Hitzegrad erzeugt. Da ein so feines Röhrchen leicht verstopft sein kann, und da daher der Fall eintreten kann, daß viel mehr Dampf erzeugt wird, als durch das Rohr entweichen kann, daß also die Spannkraft in dem Kesselchen immer größer wird, so muß man an der Aeolipile, um sie vor dem Zerspringen zu sichern, noch ein Ventil anbringen, welches durch den Dampf, sobald er eine gewisse Spannkraft erlangt hat, geöffnet wird.

§. 316. **Dampfmaschine.** Eine äußerst wichtige und großartige Anwendung hat die Spannkraft der Wasserdämpfe als bewegende Kraft in den Dampfmaschinen gefunden. Das Princip derselben läßt sich an einem ganz einfachen Apparate, dem Dampfcylinder, nachweisen. Auf eine metallene Kugel ist ein Cylinder geschraubt, in welchem sich ein Kolben luft- und dampfdicht auf und ab bewegen läßt. Wird die Kugel zum Theil mit Wasser gefüllt, und dieses verdampft, so treibt der gebildete Dampf, sobald er die nöthige Spannkraft erlangt hat, um den Druck der Atmosphäre und das Gewicht des Kolbens zu überwinden, den Kolben in die Höhe. Taucht man dann die Kugel in kaltes Wasser, so werden durch die Abkühlung die Dämpfe unter dem Kolben und in der Kugel wenigstens theilweise wieder condensirt, es entsteht ein relativ leerer Raum unter dem Kolben, dadurch bekommt der äußere Luftdruck wieder das Uebergewicht, und treibt nun den Kolben wieder nieder.

Die erste Maschine, welche den Namen einer Dampfmaschine verdiente, d. h. die erste Maschine, in welcher ein Kolben durch die Spannkraft des Dampfes in eine regelmäßige Bewegung auf und nieder versetzt wurde, hat Thomas Newcomen im Jahre 1711 construirt. Bei den nach dem Principe von Newcomen gebauten Maschinen strömte Dampf in den Cylinder unter den Kolben, und trieb diesen in die Höhe. Dadurch füllte sich der Raum unter dem Kolben mit Dampf aus dem Dampfkessel an, und wenn der Kolben die Decke des Cylinders erreicht hatte, wurde der Dampf in dem Cylinder selbst condensirt, indem man kaltes Wasser in den Raum unter dem Kolben einspritzte. Durch die Condensirung der Dämpfe entstand unter dem Kolben ein relativ leerer Raum, und der Kolben wurde daher durch den auf seine obere Fläche wirkenden Druck der Atmosphäre niederbewegt. Von diesem letzteren Umstande erhielten diese Dampfmaschinen den Namen atmosphärische Maschinen. Durch die erwähnte Methode der Condensirung geht jedoch viel Dampf und somit auch Brennmaterial verloren, weil der durch das Condensiren abgekühlte Cylinder einen Theil des neu eintretenden Dampfes nutzlos condensirt, bis er selbst wieder die Temperatur des Dampfes angenommen hat. Wenn man später auch diesen Uebelstand dadurch beseitigte, daß man den Dampf nicht mehr in dem Cylinder selbst, sondern in einem eigenen, mit demselben communicirenden Behälter condensirte, so sind doch die atmosphärischen Maschinen nach Erfindung weit vollkommenerer Constructionen außer Gebrauch gekommen.

Die wichtigste Epoche für die Damfmaschinen ist mit James Watt in der letzten Hälfte des vorigen Jahrhunderts eingetreten. Die Watt'schen Maschinen unterscheiden sich von den atmosphärischen Maschinen wesentlich dadurch, daß der Niedergang des Kolbens im Cylinder nicht durch den Druck der äußeren Atmosphäre bewirkt wird, sondern durch den über dem

Digitized by Google

Kolben einströmenden Dampf. Die Watt'schen Maschinen sind unter allen die vollkommensten, weil sie mit einer bestimmten Quantität Brennmaterial den größten Effekt hervorbringen. Diese Maschinen scheinen so ziemlich die Grenze der Vervollkommnung erreicht zu haben, deren sie fähig sind; denn von den unzähligen Vorschlägen und Abänderungen in den einzelnen Theilen und in der Dispositon des Ganzen, welche seither gemacht worden sind, haben sich nur wenige als hinreichend bewährt erhalten. Die Watt'schen Maschinen werden wieder in einfach wirkende und doppelt wirkende unterschieden. Wenn bei den einfach wirkenden Maschinen (1768 von Watt erfunden) die Bewegung des Kolbens nach Unten durch den Druck des Dampfes bewirkt, und der Kolben unten angekommen ist, so tritt, während die Verbindung zwischen dem Cylinder und dem Behälter, in welchem der Dampf condensirt wird, abgesperrt ist, durch eine Röhre eine Communication zwischen dem oberen und unteren Theil des Cylinders ein, so daß der Druck des Dampfes jetzt gleichmäßig auf die obere und die untere Fläche des Kolbens einwirkt. Der Kolben hebt sich hierauf vermittelst eines Gegengewichts, das seine Reibung und den zu dem Austreiben des Dampfes von dem Raume über in jenen unter dem Kolben nöthigen Druck überwindet. Bei den doppelt wirkenden Watt'schen Maschinen (1774 von Watt erfunden) wirkt der Druck des Dampfes abwechselnd auf beide Flächen des Kolbens, und die Condenstrung findet abwechselnd über und unter dem Kolben statt. Da hier kein leerer Kolbenhub vorhanden ist, so leistet ein Cylinder derselben Größe die doppelte Wirkung der einfach wirkenden Maschine. Diese Einrichtung ist überhaupt für die meisten Fälle, in welchen der Dampf als bewegende Kraft gebraucht wird, die vortheilhafteste; sie bringt eine beinahe gleichförmige Bewegung hervor, die abkühlende Fläche ist vermindert, ein kleinerer Dampfkessel ist hinreichend, und Umfang und Gewicht der Maschine sind verringert. Außerdem werden diese Maschinen, wie aus der noch folgenden specielleren Beschreibung derselben erhellen wird, gewöhnlich mit einem Schwungrade versehen, sowohl um die hin- und hergehende Kolbenbewegung in eine rotirende zu verwandeln, als auch um die Bewegung gleichförmig zu machen.

Nach der Größe der Spannkraft des zur Verwendung kommenden Dampfes theilt man die Dampfmaschinen ein in Niederdruck- oder Tiefdruckmaschinen und in Hochdruckmaschinen. In den ersteren geht die Spannkraft des Dampfes bis etwa zu 1½ Atmosphären, bei den letzteren bis höchstens zu 10 Atmosphären. Eine andere Eintheilung ist diejenige in Maschinen mit Condensation und Maschinen ohne Condensation, je nachdem der Dampf, wenn er zur Bewegung des Kolbens benutzt worden ist, condenstrt wird, oder sofort in die freie Luft ausströmt. Endlich theilt man die Dampfmaschinen auch noch ein in Maschinen mit Expansion und Maschinen ohne Expansion. In den ersteren wird, ehe der Kolben seinen ganzen Weg durchlaufen hat, der Zutritt des Dampfes abgesperrt, so daß die fernere Bewegung des Kolbens durch den sich ausdehnenden Dampf bewirkt wird, bei den letzteren strömt der Dampf fortwährend zu, bis der Kolben den ganzen Cylinder durchlaufen hat. Niederdruckmaschinen haben stets Condensation und nie Expansion, bei Hochdruckmaschinen aber kommt die Condensation nur in

Digitized by Google

Verbindung mit der Expansion vor, doch ist diese Verbindung nicht nothwendig, da es auch Expansionsmaschinen ohne Condensation gibt.

§. 317. **Fortsetzung.** Wir wollen nun zunächst eine doppelt wirkende Watt'sche Niederdruckmaschine, wie sie in den Fabriken meistens in Gebrauch ist, näher kennen lernen. Jede Dampfmaschine besteht aus zwei Haupttheilen, dem Kessel und der eigentlichen Maschine. Der Zweck des Dampfkessels ist, eine gegebene Menge Dampf in gegebener Zeit mit der geringsten Menge von Brennmaterial bei möglichster Sicherheit gegen die expansive Kraft der Dämpfe zu entwickeln. Die Kessel werden gewöhnlich aus Gußeisen, Eisenblech oder Kupferblech angefertigt. Gegen Gußeisen als Material sprechen folgende Gründe: 1) es bekommt durch jähe Abwechslungen der Temperatur zu leicht Sprünge; 2) seine innere Beschaffenheit ist selten hinreichend gleichförmig und fehlerfrei, so daß man sich auch bei einer bedeutenden Dicke nicht völlig auf seine Stärke verlassen kann; 3) beim Zerspringen wird es bombenähnlich zerstückt, während Kessel aus den beiden anderen Materialien in der Regel bloß Risse erhalten, aus welchen der Dampf hervordringt; 4) größere Kessel sind sehr schwer zu gießen. Eisenblech und Kupferblech werden in gehörig dicken, am besten gewalzten Blechplatten angewandt, welche mit starken Nietnägeln aus demselben Metall fest zusammengenietet werden. Wiewohl Kupferblech theoretisch den Vorzug verdient, so wird es doch wegen seines hohen Preises, und weil es die Kohlenfeuerung nicht sehr gut verträgt, viel seltener angewandt, als Eisenblech, und zwar aus den angegebenen Gründen vorzugsweise bei Holzfeuerung und bei cylindrischen Kesseln und ihre Stelle vertretenden Röhren von geringerem Durchmesser. Bei Anfertigung der Dampfkessel muß besondere Rücksicht auf die Dicke der Kesselwände genommen werden. Bei Bestimmung derselben kommt in Betracht: 1) der Halbmesser des Cylinders; 2) der Ueberschuß des innern Druckes des Dampfes auf die Wände über den Atmosphärendruck; 3) der Umstand, daß durch die Erhitzung die Cohäsion des Metalls vermindert wird; 4) daß an den genieteten oder gelötheten Stellen der Zusammenhang geschwächt ist; 5) daß das Metall wegen der verschiedenen Hitze an den verschiedenen Stellen ungleich ausgedehnt wird; 6) die eigene Stabilität des Kessels, damit er, wenn von Innen gar kein oder nur ein geringer Druck stattfindet, nicht durch seine eigene Belastung eine Biegung erleide, welche die Elasticitätsgrenze des Metalls überschreitet. Daß Dampfkessel überall dampfdicht sein müssen, leuchtet ein; sie werden es aber durch eine dichte und starke Nietung, bei Röhren durch Löthung. Kessel von Schmiedeeisen haben in dieser Hinsicht den Vorzug, daß dünne Spalten in der Nietung sich leicht von selbst theils durch Oxydation, theils durch den Absatz des Wassers ausfüllen. Tritt bei kupfernen Kesseln der Fall ein, daß einzelne Stellen der Nietung Dampf durchlassen, so ist es gut, in das Wasser des Kessels etwas Salmiak zu werfen, wodurch ebenfalls die allmählige Ausfüllung jener dünnen Spalten durch Oxydation erzweckt wird.

Die Dampfmenge, welche ein Kessel in einer bestimmten Zeit erzeugt, hängt ab: 1) von der Differenz der Temperatur der heißen Luft im Feuerheerde, welche die Kesselwände berührt, und der Temperatur des verdampfenden Wassers im Kessel; 2) von der Schnelligkeit des Uebergangs der äußeren Hitze nach Innen; 3) von der Größe der Wandfläche, welche

Digitized by Google

zwischen Wasser und Feuer liegt. Die Dampfmenge wird natürlich um so größer, je höher jener Temperaturunterschied, je größer die dampfende Fläche und je schneller die letztere die Wärme durchleitet. Man wird für alle Fälle rücksichtlich der Dampfmenge, welche der Kessel geben soll, sicher gehen, wenn man 10 Quadratfuß Metallfläche zwischen Wasser und Feuer auf ein Pfund Dampf von irgend einer Temperatur in einer Minute rechnet.

An den Kesseln sind verschiedene Vorrichtungen angebracht. Diese bezwecken 1) die regelmäßige Nachfüllung des Wassers, 2) die Regulirung des Feuers, 3) die Sicherung gegen mögliche Zufälle durch die zu große Spannung des Dampfes. — Zur Erreichung des ersten Zweckes ist für Kessel von Niederdruckmaschinen die einfachste und sicherste Vorrichtung ein in dem Kessel senkrecht stehendes Füllungs- oder Speiserohr. Diese Röhre geht durch die obere Fläche des Kessels dampfdicht, und endigt sich oben in einen Behälter, in welchem das warme Wasser mittelst einer Pumpe nachgefüllt wird. Auf dem Boden dieses Behälters befindet sich ein conisches, nach Oben sich öffnendes Ventil, dessen Bewegung durch die Bewegung des Schwimmers regulirt wird. An dem einen Arme eines zweiarmigen Hebels hängt nämlich eine Stange, welche durch eine Stopfbüchse hindurch in den Kessel geht, und an welcher im Innern des Kessels der Stein oder Schwimmer befestigt ist. Am Ende des anderen Hebelarmes ist das Gewicht des Schwimmers durch ein angehängtes Gewicht so balancirt, daß er auf dem Wasser schwimmt. Dieses letztere Ende ist nun zu gleicher Zeit durch einen Draht mit dem erwähnten Ventile verbunden. Sowie nun die Wasserfläche und mit ihr der Stein etwas niedersinkt, so öffnet sich das Ventil, und das Wasser tritt in den Kessel nach, bis durch das Steigen des Wasserstandes und des Steines das Ventil wieder geschlossen wird. Das durch die Speisepumpe in den Behälter gebrachte, überschüssige Wasser fließt durch eine an dem oberen Theile desselben angebrachte Röhre wieder ab. Bei Dampfkesseln, in welchen Dampf von höherer Spannung entwickelt wird, wird das Wasser durch eine kleine Druckpumpe, die Speisepumpe, welche durch die Maschine bewegt wird, eingepumpt.

Damit man den Stand des Wassers in dem Kessel wahrnehmen und hiernach beurtheilen könne, ob nicht eine Unregelmäßigkeit in der Wirkung des Füllungsapparates vorhanden ist, dienen auch noch 2 Hähne. Die Röhre des einen Hahns, des Wasserhahns, taucht bei dem richtigen Stand des Wassers in dem Kessel mit dem unteren Ende einige Zoll tief unter die Oberfläche des Wassers, die Röhre des anderen Hahns, des Dampfhahns, endet etwas über der Wasserfläche. Hat also das Wasser seinen gehörigen Stand, so strömt aus dem einen Wasser, aus dem andern Dampf aus; steht das Wasser zu tief, aus beiden Dampf, und wenn es zu hoch steht, aus beiden Wasser.

Daß das Füllungs- oder Speisewasser so warm wie möglich sein muß, liegt in der Natur der Sache. Wenn daher nicht das warme Wasser, welches durch die Condensation der verbrauchten Dämpfe gewonnen wird, benutzt werden kann, wie z. B. bei den Maschinen mit hohem Druck, bei welchen nicht condensirt wird, so ist es zweckmäßig, einen eigenen, kleinen Kessel anzubringen, welcher durch den von dem großen Kessel kommenden Rauch erwärmt wird, und mit letzterem durch ein Rohr in Verbindung

Digitized by Google

steht, so daß der Einfluß des Wassers unmittelbar, natürlich durch eine eigene Vorrichtung regulirt, stattfindet. Das Wasser kann nicht immer so rein genommen werden, daß nicht bei dem Sieden und Verdampfen desselben ein mehr oder weniger bedeutender Bodensatz sich absondern sollte, welcher gewöhnlich aus Gyps und kohlensaurem Kalk, zuweilen auch aus Kochsalz, Glaubersalz u. s. w. besteht, und allmählig eine steinartige Rinde, den Pfannenstein, auf dem Boden bildet. Die Bildung desselben muß möglichst verhütet werden, weil durch denselben nicht nur die Erwärmung des Kessels erschwert, sondern auch der Kesselboden da, wo das Feuer anschlägt, in kurzer Zeit zerstört wird, indem hier die Metallfläche eine viel höhere Temperatur annimmt, als wenn sie von dem Wasser unmittelbar berührt würde. Gegen die Bildung des Pfannensteins hat man schon verschiedene Mittel in Vorschlag gebracht. Das gewöhnlichste besteht darin, daß man einige gekochte oder zerquetschte Kartoffeln oder die Abfälle auf den Malzböden in den Kessel wirft. Die schleimige Eigenschaft, welche dadurch dem Wasser mitgetheilt wird, hindert das Niederfallen der feineren Theile des Niederschlags. Auch muß das Wasser von Zeit zu Zeit aus dem Kessel abgelassen, und dieser in längeren Zwischenräumen gereinigt werden.

Zu den Sicherheitsvorrichtungen müssen alle diejenigen gerechnet werden, welche verhüten, daß die Spannkraft der im Kessel entwickelten Dämpfe nicht zu groß werden kann. Für diesen Zweck ist an den Dampfkesseln oft ein Manometer angebracht, damit die Arbeiter die Vermehrung oder Verminderung der Expansivkraft des Dampfes im Kessel wahrnehmen können. Die Construction des Manometers ist jedoch in der Regel hier etwas geändert, namentlich ist der Schenkel, in welchem über dem Quecksilber die atmosphärische Luft steht, nicht luftdicht geschlossen, so daß nicht aus der Zusammendrückung der Luft auf die Größe der Spannkraft geschlossen wird, sondern einfach aus der verschiedenen Höhe des Quecksilbers in den beiden Schenkeln. Man nennt die Vorrichtung dann das Quecksilber-Visir. Zu demselben Zweck bedient man sich besonders bei Dampf von hoher Spannung oft auch des Thermometers, da mit der Temperatur des Dampfes auch seine Spannkraft wächst, so daß aus der Größe der Temperatur auf die Größe der Spannkraft geschlossen werden kann. Man befestigt dann das Thermometer mittelst einer Stopfbüchse in dem Deckel des Kessels, und schützt die etwa einen Zoll unter dem Deckel befindliche Kugel desselben mit einer durchbrochenen Halbkugel von Blech. Die Röhre außerhalb des Deckels wird mit einem oben geschlossenen gläsernen Cylinder bedeckt, der mittelst einer unteren Fassung auf den Deckel aufgeschraubt ist. Ferner hat man das Sicherheitsventil. Es ist dies in der Regel ein Kegelventil. Die die Ventilöffnung verschließende Platte hängt an dem kürzeren Arme eines einarmigen Hebels und wird durch ein Gewicht, das an dem Ende des längeren Armes angebracht ist, gegen die Oeffnung gedrückt. Das Gegengewicht muß genau abgemessen sein, damit das Ventil sich zur gehörigen Zeit, d. h. so oft die Spannkraft des Dampfes einen gewissen Grad erreicht hat, öffnet. Es richtet sich offenbar nach der Größe der Oeffnung und nach dem Verhältniß der beiden Hebelarme zu einander. Die Ventilöffnung aber, oder eigentlich die Oeffnung, welche sich bei dem Heben des Ventils darbietet, muß groß genug sein, daß bei der

Digitized by Google

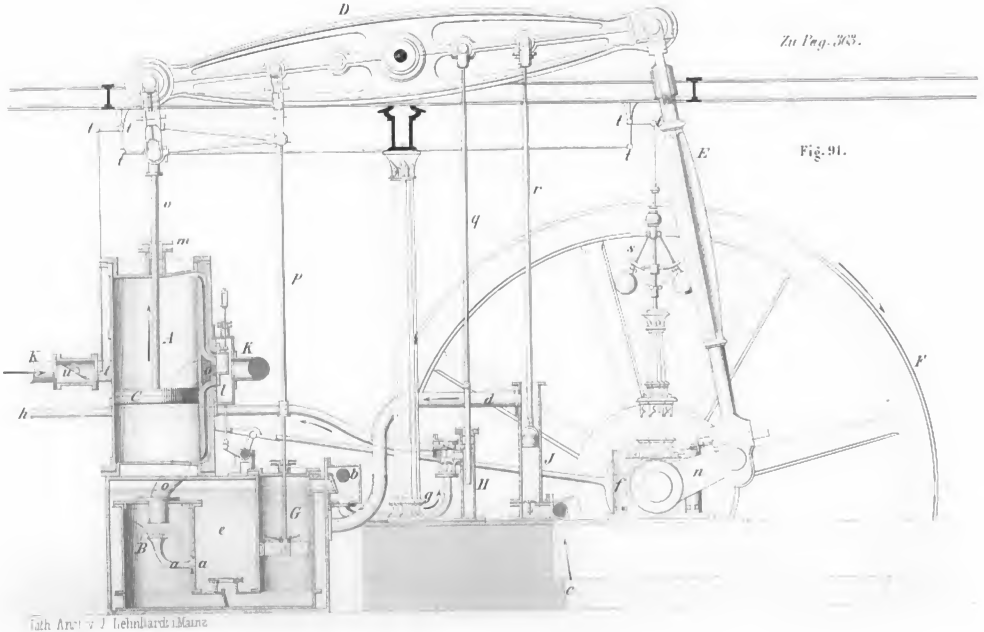
ersten Hebung des Ventils der Dampf seinen Abzug in derjenigen Menge nehmen kann, in welcher er von dem Kessel erzeugt wird. Außerdem hat man auch noch bei Dampfkesseln von Hochdruckmaschinen die Einsetzung eines Zapfens aus einer leichtflüssigen Metallmischung (Wismuth, Zinn, Blei) in den Boden oder den Deckel des Kessels in Anwendung gebracht. Der Zapfen wird auf eine Temperatur, welche einem zu fürchtenden Druck des Dampfes entspricht, berechnet. Sollte daher bei diesem Drucke das Sicherheitsventil seinen Dienst versagen, so schmilzt doch der in den Deckel des Kessels eingesetzte Zapfen, und gestattet dem Dampf den Ausgang. Der gegen solche leichtflüssige Ventilzapfen stattfindende Einwurf, daß sie bei der vor der Schmelzung eintretenden Erweichung schon vor dem Eintreten der bestimmten Temperatur durch den Druck des inneren Dampfes herausgeworfen werden, läßt sich nach der Erfahrung dadurch beseitigen, daß die untere Fläche des Zapfens mit einem Drahtgeflechte aus engen Maschen überzogen wird.

Zwei Umstände sind es namentlich, welche eine Gefahr für den Kessel herbeiführen, nämlich 1) die Vernachlässigung des Sicherheitsventils und 2) der Mangel in der richtigen Speisung des Kessels. Damit das Sicherheitsventil seine Beweglichkeit behalte, ist es nöthig, dasselbe täglich einige Male zu lüften. Die unregelmäßige Speisung des Kessels mit Wasser kann als der Grund des größten Theils der Zufälle angesehen werden, welche sich mit Dampfkesseln ereignet haben. Wird nämlich ein Theil der dem Feuer ausgesetzten Kesselwand von dem Wasser entblößt, so wird dieser Theil in viel höherem Grade erhitzt, als diejenigen Stellen, welche noch mit dem Wasser in Berührung sind. Da dann der Kessel wegen der verminderten Fläche weniger Dampf liefert, als vorher, so sieht der Arbeiter hierin eine Aufforderung, das Feuer zu verstärken, wodurch das Uebel noch mehr beschleunigt, und die Temperatur der von dem Wasser entblößten Stellen bald zur Glühhitze gebracht wird. Wenn nun der Füllungsapparat wieder in Gang kommt, sonach jene erhitzten Stellen plötzlich mit verhältnißmäßig kälterem Wasser in Berührung kommen, so entsteht eine so schnelle Zusammenziehung der inneren Fläche der erhitzten Wand, daß ein Bruch derselben unvermeidlich wird. Da nun zugleich durch die neue Benetzung der Wände mit Wasser bei der schon vorhandenen hohen Temperatur der Fläche eine plötzliche und starke Dampfentwicklung erfolgt, so wird der dadurch zu einer bedeutend höheren Spannung gebrachte Dampf die durch den Bruch geschwächte Wand weiter aufreißen, und den Kessel zur Explosion bringen.

Der Heizapparat erfordert eine vorzügliche Sorgfalt, weil die Consumtion an Brennmaterial die Dampfmaschinen hauptsächlich kostbar macht. Es ist daher nothwendig, den Heizapparat so einzurichten, daß das Brennmaterial bei gehörigem Luftzug leicht und vollständig verbrennt, die erzeugte Wärme dem Dampfkessel vortheilhaft mitgetheilt wird, und nicht zu viel heiße Luft aus dem Schornstein entweicht. Man bringt daher einen Rost an, um das Brennmaterial allgemein mit der zuströmenden Luft in Berührung zu bringen, und erhöhet den Schornstein, um hierdurch den Luftzug zu vermehren. Man umgibt ferner den Heerd mit schlecht wärmeleitenden Substanzen, und läßt die durch das Feuer erhitzte Luft und den Rauch, um dem Kessel möglichst viele Wärme mitzutheilen, von dem Heerde in einem Canale

Digitized by Google

Digitized by Google


D
Zu Pag. 303.
Fig. 91.
E
F
P
q
r
A
K
C
h
G
H
J
n
B
a
c
b
d
e
f
g
i
k
l
m
o
s
Lith. Anst. v. J. Lehnhardt in Mainz

erst wieder mitten durch den Kessel, und dann rund um denselben streichen, ehe sie aus dem Schornsteine entweichen. Da bei derselben Kesselfläche die Dampfmenge von der Stärke des Feuers abhängt, so verdient die Regulirung desselben alle Sorgfalt. Außer der gleichförmigen Arbeit des Schürens dient dazu ein Register, das den Luftzug mehr oder weniger absperrt. Die Register sind in der Regel Schieber, welche in dem Canale, der die Luft unter den Rost führt, angebracht werden, und die in der Regel auch von der Maschine selbst regulirt werden.

§. 318. **Fortsetzung.** Der in dem Kessel gebildete Dampf tritt durch das Dampfzuleitungsrohr K (Fig. 91) in den Schieberkasten I, aus welchem 3 Canäle führen, zwei nach dem Cylinder A, und zwar der eine nach dem obersten, der andere nach dem untersten Theile desselben, wie aus der Figur ersichtlich ist. Der mittelste Canal führt nach dem Condensator B. Vor diesen 3 Canälen bewegt sich das Schieberventil, das zwei der Canäle verschließt, und einen der äußersten frei läßt, und zwar nach der Stellung, welche es in unserer Figur hat, den untersten. Der Dampf tritt also durch diesen Canal in den Cylinder, und zwar hier unter den Kolben C, wodurch derselbe in die Höhe getrieben wird. Was nun zunächst die Construction des Cylinders und des Kolbens betrifft, so ist darüber Folgendes zu merken. Der Cylinder wird gewöhnlich senkrecht gestellt. In dieser Lage ist nämlich die Reibung des Kolbens auf die Seitenwände am gleichförmigsten. In horizontal oder schief liegenden Cylindern drückt der Kolben auf die untere Wandfläche mit einem Theile seines Gewichtes, wodurch eine größere Reibung entsteht, als an dem oberen Theile. Es findet hier also auch ein größerer Dampfverlust statt, die Cylinder schleifen sich ungleich aus, und werden dadurch früher unbrauchbar. Was das Verhältniß des Cylinders zur Hubhöhe des Kolbens betrifft, so nimmt man diese in der Regel dem doppelten Durchmesser gleich. Die Dicke der Cylinderwände richtet sich natürlich nach der Spannung des zu verwendenden Dampfes und dem Durchmesser des Cylinders, und muß für die einzelnen Maschinen besonders berechnet werden. Der Kolben soll, um möglichst den Dampfverlust zu vermeiden, so dampfdicht wie möglich schließen. Dies kann aber nicht geschehen, ohne daß dadurch die Reibung vermehrt würde. Der Kolben muß im Verhältniß zu seinem Durchmesser eine hinreichende Dicke erhalten, welche die erforderliche gleichmäßige Leitung desselben in dem Cylinder bewirkt, so daß er bei dem Druck des Dampfes auf ihn seine auf die Are des Cylinders senkrechte Stellung auch ohne die Leitung der Kolbenstange behalten würde, wenn auch an einzelnen Theilen seiner Peripherie die Reibung ungleich wäre. Die Kolbendicke muß wenigstens $\frac{1}{8}$ bis $\frac{1}{6}$ des Durchmessers betragen. Der mittlere Theil der Dicke des Kolbens trägt wenig zur Stetigkeit seiner Bewegung bei, vermehrt jedoch die Reibung. Es ist daher im Allgemeinen besser, dem oberen und unteren Theil der Kolbendicke den besten Schluß zu geben, den mittleren Theil aber weniger dicht zu liedern. Die Kolben sind entweder mit Hanf geliedert oder ganz von Metall. Bei den ersteren ist die Verschließung des Zwischenraums, welcher zwischen den Metallscheiben des Kolbens und der Wand des Cylinders bleibt, durch eingepreßten Hanf bewirkt. Diese Einrichtung ist die häufigste. Die hanfenen Zöpfe, welche man gewöhnlich dazu verwendet, beschmiert man vor dem Einlegen mit Talg, um die Zwi-

Digitized by Google

ſchenräume auszufüllen, und das Aneinanderpreſſen zu befördern. Auch muß der Kolben während des Ganges der Maſchine mit Talg verſehen werden, welcher durch einen, im oberen Deckel des Cylinders befindlichen, mit einem Hahne zu ſperrenden Trichter von Zeit zu Zeit in den Cylinder eingelaſſen wird. Bei den metallenen Kolben wird die Hanfliederung durch Metallringe erſetzt, welche durch den Dampf und mittelſt Federn an die Wände des Cylinders angedrückt werden. Dieſe haben vor den mit Hanf gliederten den Vorzug einer größeren Dauerhaftigkeit und geringeren Reibung, ſie erfordern jedoch eine viel genauere Arbeit und einen vollkommen gebohrten Cylinder. Durch den Kolben wird die cylindriſch gedrehte Kolbenſtange v mitgehoben, welche in einer Stopfbüchſe m läuft, die ſo eingerichtet iſt, daß ſie dem Dampf keinen Durchgang geſtattet. Der Kolben muß in ſeiner Bewegung auf- und niederwärts in einer ſenkrechten Lage erhalten werden, weil ſonſt ein ſchädlicher Seitendruck auf die Stopfbüchſe und auf die Cylinderwand erfolgen würde, welche die Reibung vermehrt und die Dichtung vermindert. Dieſer Zweck wird erreicht durch das ſogenannte Parallelogramm, vermittelſt welches ſie mit dem Balancier D verbunden iſt. Wäre ſie nämlich unmittelbar an dem Ende des Balancier befeſtigt, ſo würde ſie abwechſelnd etwas rechts und links gezerrt werden. Das Parallelogramm iſt ein Syſtem beweglicher Stangen, das dieſen Namen führt, weil die Stangen ſo verbunden ſind, daß ſie die Geſtalt eines Parallelogramms zeigen. Der Balancier wird in der Regel von Gußeiſen gemacht, wobei aber vorzüglich auf eine geringere Sprödigkeit und Brüchigkeit deſſelben zu ſehen iſt. Als Probe ſchlägt man mit einem Hammer gegen eine Ecke deſſelben, und wenn dieſelbe einen Eindruck erhält, als wäre ſie hämmerbar, ſo iſt das Eiſen gut; ſpringen aber Splitter ab, ſo iſt es hart und brüchig. Die Form des Balancier wird zur Verhütung eines zu großen Gewichtes ſo gewählt, daß er in der Mitte die doppelte Höhe als an den Enden hat, indem er zur größeren Stärke höher, als breit, ſein muß, und außerdem kann man ihn zur Verminderung ſeines Gewichtes durchbrochen anfertigen. Indem nun das eine Ende des Balancier, an welchem die Kolbenſtange mittelſt des Parallelogramms befeſtigt iſt, durch die Kolbenſtange gehoben wird, ſenkt ſich das andere Ende. An dieſem iſt die Treibſtange E befeſtigt, welche den Balancier mit der Kurbel n verbindet. Sie und die Kurbel dienen dazu, um die auf- und niedergehende Bewegung des Balancier in eine ſtetige kreisförmige Bewegung umzuwandeln. In der Stellung, welche in unſerer Figur dargeſtellt iſt, wird nämlich die Kurbel durch die Treibſtange auch nach Unten bewegt, und da durch die Kurbel, welche bei gleicharmigen Balanciers die halbe Länge des Kolbenhubs haben muß, das Schwungrad F in Bewegung geſetzt wird, ſo muß ſich dieſes in der Richtung des Pfeils bewegen. Das Schwungrad iſt eine vorzügliche Vervollkommnung des Mechanismus der Dampfmaſchinen, welche ihnen durch Watt zu Theil wurde, und ſie für alle möglichen Arten der Maſchinerie brauchbar machte. Es dient auch dazu, die Bewegung der Maſchine gleichförmig zu erhalten. Selbſt wenn der Druck des Dampfes auf den Kolben ganz unveränderlich wäre, ſo würde er doch nicht bei allen Stellungen der Kurbel gleichviel zu deren Umdrehung beitragen können. Die Bewegung des Kolbens iſt aber in der Mitte des Cylinders am größten. Wenn der Kurbelarm vertical ſteht, wirkt jeder Druck, welcher vom Kolben

Digitized by Google

ausgeht, einzig und allein als Druck auf die Kurbelare; wenn in dieser Stellung die Maschine still stände, so würde der größte Druck auf den Kolben sie nicht in Bewegung setzen können. Daß also die Maschine, indem sie in diese Stellung kommt, nicht absolut still stehen bleibt, rührt einzig und allein daher, daß die einzelnen Maschinentheile vermöge ihrer Trägheit ihre Bewegung fortsetzen. Hat einmal die Kurbel die verticale Stellung passirt, so wird nach und nach ein immer größerer Antheil des auf sie ausgeübten Druckes auf die Umdrehung der Kurbel wirken. Dieser Antheil wird am größten sein, wenn der Kurbelarm wagrecht ist. Die Kraft also, welche die Kurbel umdreht, variirt beständig. Während einer ganzen Umdrehung wird sie zweimal Null, wenn nämlich der Kurbelarm seine höchste und seine tiefste Stellung einnimmt, und zweimal erreicht sie ein Maximum. Die Differenzen zwischen der größten und der geringsten Geschwindigkeit werden aber um so kleiner werden, je größer die bewegte träge Masse ist. Durch ein hinlänglich großes Schwungrad kann man es dahin bringen, daß diese Differenzen in der Umdrehungsgeschwindigkeit so unbedeutend werden, daß sie keinen nachtheiligen Einfluß mehr haben. In diesem Fall kann nämlich die stärker wirkende Kraft der Kurbel keine merkliche Vermehrung der Geschwindigkeit bewirken, weil sie eine sehr bedeutende träge Masse bewegen muß. Weil aber im Schwungrad gleichsam eine bedeutende Bewegungsquantität angehäuft ist, ist doch die Abnahme der Bewegungsquantität, wenn die Kurbel in die für die Bewegung ungünstigen Lagen kommt, nicht groß genug, um eine merkbare Verminderung der Geschwindigkeit zu veranlassen. Deßhalb ist auch das Schwungrad meistens von einem ganz außerordentlichen Gewichte, bei den großen Maschinen an 20,000 Pfund schwer. Die Arbeit desselben muß genau und gut sein, weil sich ein Punkt des Randes oft mit mehr, als 300 Fuß Geschwindigkeit in einer Secunde bewegt. Die Speichen sind in der Regel an den Seiten scharf zulaufend, um die Luft mit geringerem Widerstande zu durchschneiden. Wenn nun der Kolben oben an dem Cylinder angekommen ist, hat sich unterdessen der Schieber abwärts bewegt, so daß er jetzt den mittelsten und untersten Canal verschließt, und den obersten frei läßt. Der Dampf tritt also jetzt über den Kolben, um ihn niederzudrücken. Soll sich aber der Kolben bewegen, so muß der Dampf unter dem Kolben, der denselben in die Höhe getrieben hat, entweichen können. Es ist ihm aber nur ein Weg, durch den unteren Canal nach dem Schieber und von hier durch den mittleren Canal o nach dem Condensator B geboten. In den Condensator tritt dadurch ein Theil des zu condensirenden Dampfes aus dem Cylinder. Durch das einspritzende, kalte Wasser wird dieser condensirt, es entsteht ein relativ leerer Raum, der sich sofort mit einem neuen Antheil Dampf aus dem Cylinder anfüllt, der wieder condensirt wird u. s. f. Die Wirkung der Maschine wird natürlich um so größer, je vollkommner die Condensation erfolgt, d. h. je geringer die Spannung des Dampfes ist, welcher in dem Condensator und in dem mit ihm communicirenden Theil des Cylinders zurückbleibt. Da dichter Dampf, welcher mit Wasser in Berührung kommt, sich weniger schnell condensirt, als weniger dichter, so muß der Condensator einen hinreichenden Raum haben, damit der Dampf, welcher den Cylinder verläßt, in demselben sich ausdehnen könne. Von dem Balancier hängen noch drei Stangen herab, und werden durch denselben mitbewegt. Die

Digitized by Google

Stange p ist die Kolbenstange der Luft- und Warmwasserpumpe G. Sowohl das Wasser, welches zum Condenstren dient, als auch jenes im Dampfkessel, entwickelt nämlich bei seiner Erhitzung eine gewisse Menge Luft, welche mit dem Dampf in den Cylinder tritt, oder mit dem kalten Wasser in den Condensator gebracht wird, und sich ohne weitere Abhilfe in kurzer Zeit so anhäufen würde, daß sie dem Drucke des Dampfes in dem Cylinder einen Widerstand entgegensetzte, welcher den Gang der Maschine unterbräche. Diese Luft sowohl, als das durch die Condenstrung entstandene warme Wasser werden mittelst dieser Pumpe aus dem Condensator weggeschafft. Das ausgepumpte, durch die Condensation der Dämpfe erwärmte Wasser fließt entweder durch den Canal b ab, oder wird durch die Kesselspeisepumpe H, deren Kolbenstange q die zweite der an dem Balancier befestigten Stangen ist, und durch die Röhre h in den Kessel gepumpt, um denselben mit Speisewasser zu versehen. g ist die Zuflußröhre zur Kesselspeisepumpe. Die Stange r endlich ist die Kolbenstange, der Kaltwasserpumpe J, c ist die Saugröhre und d das Abflußrohr derselben, welches das Wasser in die Cisterne e bringt, von wo es durch die Injectionsröhre a in den Condensator einspritzt. Bei k sind zwei conische Räder, von welchen das verticale auf der Are des Schwungrades befestigt ist, so daß beide durch das Schwungrad mit in Bewegung gesetzt werden. An der Are des horizontalen ist der Regulator s angebracht. Je schneller nun die Maschine geht, desto mehr entfernen sich die Kugeln des Regulators von ihrer Are, und setzen dadurch eine Verbindung von Winkelhebeln t, t... in Bewegung, mit deren äußerstem Ende die Are der in dem Dampfzuleitungsrohr befindlichen Drehklappe u verbunden ist, welche also durch den Regulator in Bewegung gesetzt wird, so daß sich dieselbe mehr öffnet, wenn die Maschine zu langsam geht, und mehr schließt, wenn sie schneller zu laufen anfängt, sonach der Dampfzufluß in dem Maße vermehrt oder vermindert wird, als der Widerstand der Last sich vermehrt oder vermindert. In mehreren Fällen nämlich, in welchen die Dampfmaschine als bewegende Kraft dient, ist die zu verrichtende Arbeit oder der zu überwindende Widerstand veränderlich. Nimmt dieser ab, so vermehrt sich die Geschwindigkeit der Maschine über diejenige, welche für die zu leistende Arbeit am vortheilhaftesten ist, was Nachtheil und Verlust zur Folge hat, z. B. bei einer Spinnmühle, wo, wenn ein Theil der Spinnstühle außer Gang gesetzt ist, die übrigen bei der gleichförmigen Kraft der Dampfmaschine so schnell laufen würden, daß ein bedeutender Verlust durch Reißen der Fäden und Verminderung der Qualität des Garns entstehen würde.

Wir wollen nun noch die Vorrichtung betrachten, durch welche die Maschine selbst dem Schieberventil stets die richtige Stellung ertheilt, und da diese in Fig. 91 theilweise nicht zu sehen ist, so soll sie durch Fig. 92, 93 und 94 näher erläutert werden.

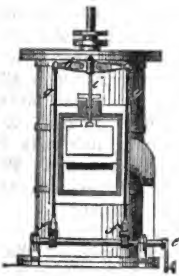
Digitized by Google

Fig. 92.

Fig. 93.

Die ganze Vorrichtung, welche das Auf- und Niederziehen des Schieberventils bewirkt, wird mit dem Namen der Steuerung bezeichnet.

Fig. 94.



Hat die Maschine ein Schwungrad, so geschieht die Steuerung durch dieses, indem der Steuerungsmechanismus mit dessen Are in Verbindung gesetzt ist. Der wichtigste Theil der äußern Steuerung ist die excentrische Scheibe a (Fig. 92 und 93), eine kreisförmige Scheibe, welche an der Are b des Schwungrades befestigt ist, deren Mittelpunkt aber nicht mit dem Mittelpunkt der Umdrehung zusammenfällt. Während jeder Umdrehung der Are beschreibt der Mittelpunkt der excentrischen Scheibe einen Kreis. Um den Umfang der excentrischen Scheibe ist nun ein Ring gelegt, der sich nach der einen Seite in eine Stange c verlängert (Schub- oder Steuerungsstange), deren Ende d in einen Hebelarm eingreift, der um eine feste Are e drehbar ist. Die Entfernung des Mittelpunktes der excentrischen Scheibe von dem Endpunkte des Hebelarms ist unveränderlich. Die Sehne des Bogens, welchen während einer Umdrehung dieser Endpunkt beschreibt, ist demnach nothwendig dem Durchmesser desjenigen Kreises gleich, welchen der Mittelpunkt der excentrischen Scheibe beschreibt. An der festen Are e sind zwei vollkommen gleiche und parallele Hebelarme f (Fig. 94) befestigt, welche sich zu beiden Seiten des Behälters befinden, in welchen das Schieberventil eingeschlossen ist. An jedem dieser beiden Hebelarme ist eine vertical nach Oben gerichtete Stange g befestigt, und oben sind diese durch eine horizontale Querstange h verbunden, an deren Mitte die Stange i hängt, an welcher das Schieberventil befestigt ist. In Fig. 92 ist der Moment dargestellt, in welchem der Mittelpunkt der excentrischen Scheibe am weitesten nach Links liegt. Man sieht hier, daß dann die Stange g, und somit auch die Schieberstange i, am meisten gehoben, der Schieber also die Stellung in Fig. 94 hat. — In Fig. 93 dagegen liegt der Mittelpunkt der excentrischen Scheibe am weitesten nach Rechts, wodurch die Stange g und somit auch die Schieberstange i niedergezogen sind. Der Schieber selbst muß also die Stellung haben, in welcher der unterste Canal geschlossen und der oberste frei ist.

Am Balancier brachte Watt noch einen eigenen Apparat an, den Zähler, eine Vorrichtung, vermittelst welcher der Balancier bei jedem Niedergang einen Zahn weiter schiebt, so daß man nach einer gegebenen

Digitized by Google

Zeit die Zahl der Hebungen wissen kann. Indem man nachher dieses Register mit dem Durchmesser des Kolbens und dem Raume vergleicht, welchen er bei jeder Bewegung durchläuft, erhält man die Wirksamkeit der Maschine. Da diese Vorrichtung nur ein theoretisches Interesse hat, so findet sie sich an den Maschinen in der Regel nicht.

Die Größe der Leistung wird gewöhnlich nach Pferdekräften angegeben, nämlich nach derjenigen Leistung, welche ein Pferd bei achtstündiger Tagesarbeit zu vollbringen im Stande ist. Dieses Maß wurde zuerst von Boulton und Watt eingeführt, da damals Pferde allgemein als bewegende Kraft in denjenigen Anstalten verwendet wurden, an deren Stelle zuerst die Dampfmaschinen traten. Watt ging dabei von der Annahme aus, daß ein Pferd mit einer Geschwindigkeit von 2½ engl. Meilen 150 Pf. in der Stunde bewege, was eben so viel ist, als 33,000 Pf. engl. in einer Minute auf einen Fuß gehoben, oder 25,500 Pf. Wiener Gewicht. Die Angabe der Wirkung der Dampfmaschinen nach der Einheit einer Pferdekraft ist bequemer und allgemeiner, als die Angabe des mechanischen Momentes in Pfunden, und hat mit dieser gleiche Genauigkeit, wenn für die Einheit einer Pferdekraft ein unveränderliches Maß beibehalten wird. Daß man das mechanische Moment der Maschine erst berechnen, und dann auf Pferdekräfte reduciren muß, versteht sich von selbst. Das mechanische Moment aber richtet sich nach der Spannung des wirkenden Dampfes, nach dem Durchmesser des Kolbens und nach der Größe der Kolbenhübe.

Der Aufwand an Brennmaterial ist der Menge des Dampfes proportional, welche für die Wirkung der Maschine verbraucht wird. Im Mittel kann man annehmen, daß ein Pfund Steinkohlen bei zweckmäßiger Feuerung 7 Pfund Wasserdampf geben. Hiernach würde man für jede Pferdekraft 8⅛ Pfund Kohlen in einer Stunde brauchen. Bei kleineren Maschinen unter 20 Pferdekräften ist der Brennstoffaufwand größer wegen der größeren Kolbenreibung und des größeren Dampfverlustes. Wird Holz als Brennmaterial angewandt, dessen Heizkraft in gewöhnlich trockenem Zustande sich zu jener der Steinkohlen wie 4,72 zu 10,9 verhält, so braucht man $\frac{1}{100}$ Wiener Klafter 2½füßiges Tannen- oder Fichtenholz in einer Stunde für eine Pferdekraft.

Die Schiffsdampfmaschine ist im Wesentlichen ganz nach denselben Principien construirt wie die Watt'sche Maschine. Was aber den äußeren Bau der Schiffsmaschine betrifft, so ist eine Verschiedenheit dadurch bedingt, daß die Hauptare, auf welche die Bewegung des Kolbens übertragen werden soll, die Are der Schaufelräder ist, deren unterer Theil nur in das Wasser eingetaucht sein darf. Die Are dieser Räder muß sich demnach in einer namhaften Höhe über dem Wasserspiegel befinden. Wollte man aber den Balancier und die Treibstange so anbringen, wie bei der gewöhnlichen Watt'schen Maschine, so käme diese Are zu tief zu liegen. Deßhalb ist hier der Balancier unten angebracht, und die Treibstange nach Oben gerichtet. Außerdem befindet sich auf jeder Seite der Maschine ein Balancier, welche sich beide um dieselbe Are drehen. Oefters stehen auf den Schiffen 2 solcher Maschinen neben einander, welche an derselben Are arbeiten, ihr Gang ist aber so regulirt, daß in der einen der Kolben die Mitte des Cylinders passirt, während der Kolben in der anderen oben oder unten ankommt, daß also die Kurbel der einen Maschine eine ver-

Digitized by Google

ticale Stellung hat, während die Kurbel der andern wagrecht steht. Man hat auch Schiffsdampfmaschinen ohne Balancier gebaut. Bei diesen steht der Cylinder nicht aufrecht, sondern schräg, so daß seine Axe mit der Horizontalen einen Winkel von 20 bis 25° macht. Denkt man sich die Axe des Cylinders dieser Maschinen verlängert, so trifft diese Verlängerung die Umdrehungsaxe der Schaufelräder. Die Treibstange verbindet dann unmittelbar die Kolbenstange mit der Kurbel.

§. 319. **Hochdruckmaschine; Locomotive.** In den bisher betrachteten Maschinen war der Condensator ein wesentlicher Theil. Betrachten wir nun, welchen Einfluß die Weglassung des Condensators haben wird. Wenn auf der einen Seite des Kolbens Dampf von einer Atmosphäre Spannkraft wirkt, derjenige Theil des Cylinders aber, welcher auf der andern Seite des Kolbens liegt, nicht mit dem Condensator, sondern mit der freien Luft in Verbindung steht, so ist der Druck des Dampfes auf der einen Seite dem Druck der atmosphärischen Luft auf der anderen Seite des Kolbens gleich; es ist also keine Bewegung möglich. Um eine solche hervorzubringen, muß die Spannkraft des Dampfes gesteigert werden. Gesetzt, sie sei gleich dem Drucke von zwei Atmosphären geworden, so wird der Effekt grade derselbe sein, als ob auf der einen Seite des Kolbens ein leerer Raum wäre, und auf der anderen Seite Dampf von einer Atmosphäre Spannkraft drückte. Die Hälfte der gesammten Dampfkraft geht also zur Ueberwindung des Luftwiderstandes verloren. Hätte der wirkende Dampf eine Spannkraft von 3, 4, 5 u. s. w. Atmosphären, so würde ohne Condensator $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{4}{5}$ u. s. w. der gesammten Dampfkraft zur Ueberwindung des Luftwiderstandes verloren gegangen sein. Je größer also die Spannkraft des Dampfes ist, ein desto geringerer Antheil der gesammten Dampfkraft geht verloren. Außerdem wird bei den Maschinen ohne Condensator auch noch ein Theil der Dampfkraft dadurch gewonnen, daß keine Luftpumpe da zu sein braucht, deren Bewegung bei den anderen Maschinen immer einen Theil der Kraft in Anspruch nimmt. Maschinen ohne Condensator sind eben die Hochdruckmaschinen. Sie sind ihrer Construction nach die einfachsten. Der Dampf tritt aus dem Kessel in den Cylinder mit einer den Druck der Atmosphäre bedeutend überwiegenden Spannkraft, mit welcher derselbe den Kolben in dem Cylinder fortschiebt, und nach vollbrachter Wirkung in die Atmosphäre entweicht. Die vortheilhafteste Anwendung der Hochdruckmaschinen findet in den Fällen statt, wo der Dampf, statt in die Atmosphäre zu entweichen, zur Erwärmung von Wasser, oder zur Heizung von Wohnungen, Arbeitsräumen, Trockenstuben ꝛc. verwendet werden kann. In diesen Fällen ist die Einrichtung der Hochdruckmaschinen ökonomischer, als irgend eine andere. Es ist dann am zweckmäßigsten, den Druck des Dampfes im Kessel zwischen $2\frac{1}{2}$ und 3 Atmosphären zu nehmen. Die Hochdruckmaschinen haben aber auch bei gleichem Effekt kleinere Dimensionen, denn der Gesammtdruck eines Dampfes von 4 Atmosphären Spannkraft auf eine Fläche von 1 Quadratfuß ist ja ebenso groß, als der Gesammtdruck eines Dampfes von einer Atmosphäre Spannkraft auf eine Fläche von 4 Quadratfuß. Man wendet sie daher überall da an, wo es ohne Rücksicht auf Brennstoffersparung darauf ankommt, eine Maschine von bedeutender Kraft auf einen kleinen Raum zu bringen.

Digitized by Google

Unter allen Hochdruckmaschinen ist die Locomotive eine der bekanntesten und interessantesten, weßhalb wir auch ihre Einrichtung etwas näher kennen lernen wollen. Die Figur 95 zeigt uns in I einen verticalen Längendurchschnitt durch die Mitte des Kessels, und in II einen horizontalen Längendurchschnitt in der Höhe der Cylindermitte. Am hinteren Theile der Locomotive ist der Feuerraum a, den Boden desselben bildet der Rost b, unter welchen durch den Raum c die Luft zu dem Feuer zuströmt. Von dem Feuerraum ist aber für die erhitzte Luft kein Ausweg, als eine Reihe horizontaler Röhren d, welche nach der an dem vorderen Ende unter dem Schornsteine befindlichen Rauchkammer e führen. Aus der letzteren geht die erhitzte Luft mit dem Rauche durch den Schornstein f in die Höhe. Die Röhren d gehen mitten durch einen mit Wasser angefüllten Raum, außerdem ist auch der Feuerraum selbst von allen Seiten mit Wasser umgeben. Durch die außerordentlich große Feuerfläche, mit welcher auf diese Weise das Wasser in Berührung ist, bildet sich in jedem Augenblick eine bedeutende Dampfmenge. Die Dämpfe sammeln sich natürlich über dem Wasser in dem Raume g und in dem damit communicirenden Dome h, und werden durch die Röhre i, deren eines Ende oben in dem Dome mündet, den Cylindern zugeführt.

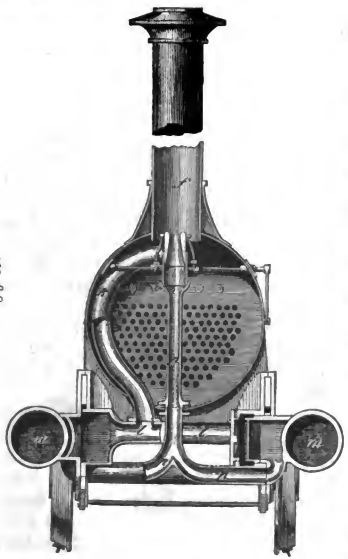


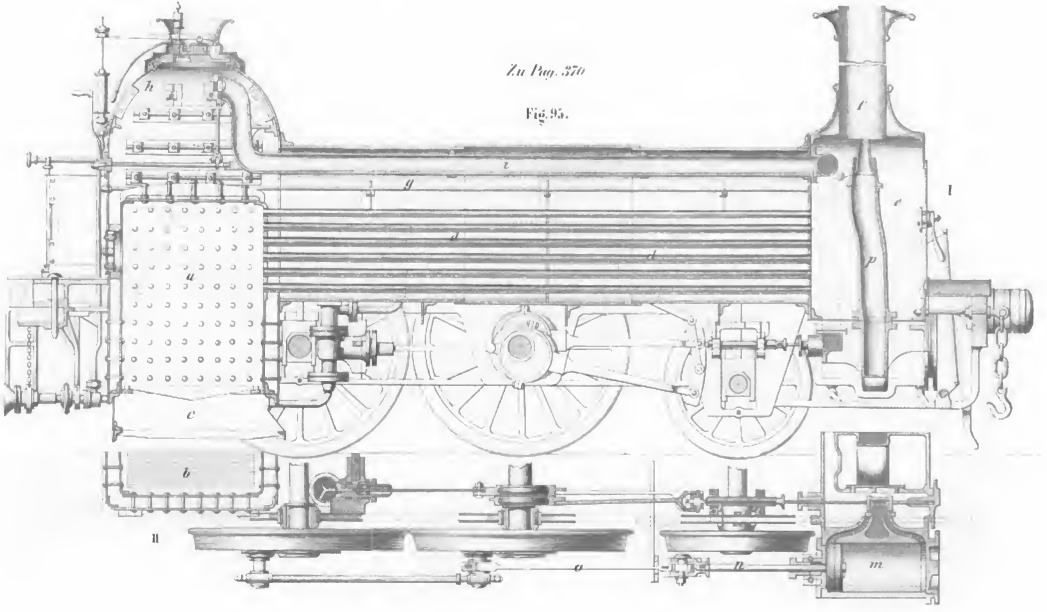
Fig. 96.

Die Art und Weise, wie dies geschieht, ist aus Fig. 96 ersichtlich, welche einen verticalen Querdurchschnitt durch die Mitte der Rauchkammer und des Schornsteines darstellt. Das Dampfrohr i (Fig. 95) ist nämlich mittelst einer aufgelötheten messingenen Scheibe mit vorspringendem Rande in der Rohrwand des Rauchkastens gedichtet. An diese Dichtungsscheibe schließt sich das gebogene kupferne Dampfrohr k (Fig. 96) an, durch welches der Dampf in den Verbindungscanal l der Schieberkasten dicht an der Rauchkammerwand hergeleitet wird. Auf jeder Seite des Wagens liegt vorn ein Cylinder m horizontal, und die Kolben sammt den Kolbenstangen n (Fig. 95,II) gehen in einer horizontalen Richtung hin und her. Am Ende der Kolbenstange n ist unmittelbar das eine Ende der Treibstange o befestigt, deren anderes Ende in die Kurbel der Axe der Mittelräder eingreift, so daß also durch jeden Hin- und Hergang des Kolbens eine ganze Umdrehung des Rades erfolgt. Bei jedem Hin- und Hergange des Kolbens geht daher der Wagen um eine Strecke weiter, welche

Digitized by Google

Zu Pag. 370

Fig. 95.



Digitized by Google

Digitized by Google

dem Umfange der mittleren Räder gleich ist. Daß die Bewegung der beiden Kolben so regulirt sein muß, daß, wenn der Kolben des einen Cylinders die Mitte passirt, derjenige des anderen Cylinders grade die ganze Länge des Cylinders zurückgelegt hat, oder daß, wenn die eine Kurbel horizontal steht, die andere vertical auf- oder abwärts steht, ist aus dem vorhergehenden Paragraph klar. Der in den Cylindern verbrauchte Dampf wird durch eine mit den Schieberventilen in Verbindung stehende Vorrichtung, der Dampfausströmröhre p, in den Schornstein abgeleitet (Fig. 96 und Fig. 95, l).

Einer besonderen Erläuterung bedarf aber auch noch die Steuerungsvorrichtung, da es nothwendig ist, daß man in jedem Augenblicke die Bewegung der Maschine in die grade entgegengesetzte verwandeln kann.

Fig. 97.

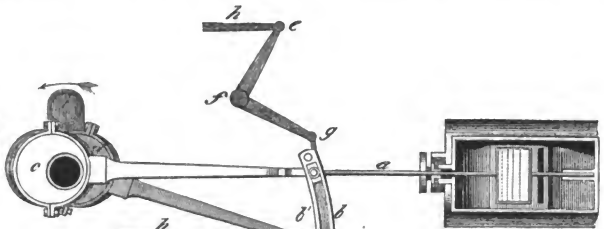


Fig. 98.

Die Schieberstange a (Fig. 97 und 98) ist mit ihrem Ende zwischen zwei concentrischen, eisernen Bögen b und b' gefaßt, deren Enden auf beiden Seiten mit einander verbunden sind. Die Verbindung dieser beiden Bögen führt den Namen Hängtasche. Am oberen Ende der Hängtasche ist die Stange der excentrischen Scheibe c und am unteren Ende diejenige der excentrischen Scheibe d befestigt. Beide excentrischen Scheiben sitzen dicht neben einander auf der Axe der Mittelräder, doch so, daß ihre Mittelpunkte diametral einander gegenüber liegen. Dadurch wird bewirkt, daß die beiden Enden der Hängtasche immer nach entgegengesetzten Richtungen bewegt werden. In der Stellung der Hängtasche, welche in Fig. 97 gezeichnet ist, richtet sich die Bewegung der Schieberstange offenbar nach der Bewegung der excentrischen Scheibe c. In der Stellung aber, welche in Fig. 98 dargestellt ist, hängt sie von der Bewegung der excentrischen Scheibe d ab. In dem Momente also, in welchem die Führung der Schieberstange von der einen excentrischen Scheibe auf die andere übertragen wird, ge-

Digitized by Google

geschieht eine Umkehrung der Bewegung der Schieberstange. Diese Uebertragung wird bewirkt durch den Winkelhebel e f g, der bei f seinen Drehpunkt hat, dessen eines Ende g durch eine Stange mit der Hängetasche und dessen anderes Ende e mit einer Stange h verbunden ist, die nach der Stelle, wo der Locomotivführer sich befindet, hinführt. Hat nun der Winkelhebel die Lage wie in Fig. 97, wo also die Schieberstange durch c geführt wird, und der Locomotivführer zieht die Stange h nach sich hin, so kommt der Winkelhebel in die Lage wie in Fig. 98. Dadurch wird aber die Hängetasche gehoben, die Führung der Schieberstange an d übertragen und die Bewegung der Schieberstange umgekehrt. Hat dagegen der Winkelhebel die Lage wie in Fig. 98, und der Führer stößt die Stange h nach Vornen, so kommt der Winkelhebel in die Lage wie in Fig. 97, und es findet dadurch abermals eine Umkehrung der Bewegung der Schieberstange statt. Es bleibt nun nur noch zu zeigen, wie dadurch, daß die Schieberstange eine entgegengesetzte Bewegung annimmt, auch die Richtung, nach welcher sich die Räder drehen, umgekehrt wird. Die Kurbel i in Fig. 97 steht nach Oben. Der Kolben ist also in der Mitte des Cylinders. Der Mittelpunkt der excentrischen Scheibe c ist so weit links, als möglich, also auch die Schieberstange und der Schieber. Es ist demnach von den Canälen, welche von dem Schieberkasten nach dem Cylinder führen, der rechts liegende offen, wie auch aus der Figur zu ersehen ist. Würde nun an der Steuerung Nichts geändert, so würde also der Dampf rechts von dem Kolben in den Cylinder treten, den Kolben nach Links bewegen, wodurch auch die Kurbel sich in der Richtung des Pfeils bewegen müßte. Wird aber in diesem Momente die Hängetasche in die in Fig. 98 abgebildete Lage gebracht, so kommt dadurch Schieberstange und Schieber so weit rechts, als möglich. Nun ist der nach Links liegende Canal offen, der Dampf tritt also links von dem Kolben in den Cylinder, und treibt den Kolben nach Rechts, wodurch sich die Kurbel jetzt in der Richtung bewegen muß, welche in Fig. 98 durch den Pfeil angedeutet ist, und welche der früheren grade entgegengesetzt ist.

Viertes Kapitel.

Von dem Messen der Wärmemengen, welche zur Erzielung bestimmter Wirkungen erfordert werden.

§. 320. **Maßeinheit für die Wärme.** Wir haben zwar in §. 301 und 302 schon Instrumente kennen gelernt, welche Thermometer oder Wärmemesser heißen, wir haben uns aber auch überzeugt, daß sie diesen Namen mit Unrecht führen, da sie nur Veränderungen in dem Wärmezustand der Körper anzeigen, keineswegs aber diejenige Wärmequantität, welche nothwendig ist, eine solche Veränderung hervorzubringen. Sollen Wärmequantitäten gemessen werden, so kann dies nur durch eine ganz bestimmte und bekannte Wärmemenge geschehen, welche als Maßeinheit angenommen wird. Es ist zwar ganz gleichgültig, welche Menge zu diesem Behufe genommen wird, aber, um zu verhüten, daß nicht jeder nach einem anderen Maße messe, und um zu bewirken, daß die Angaben eines Phy-

Digitized by Google

ſikers allen verſtändlich ſeien, war es wünſchenswerth, daß man ſich über eine beſtimmte Wärmemenge verſtändigte, welche als Einheit zu Grunde gelegt würde. Man hat dazu diejenige Wärmemenge gewählt, welche die Temperatur einer Gewichtseinheit Waſſer um einen Grad erhöht. Wenn man alſo von der Wärmemenge 50 ſpricht, ſo hat man darunter diejenige Menge zu verſtehen, welche die Temperatur einer Gewichtseinheit Waſſer um 50°, oder, was daſſelbe iſt, welche die Temperatur des 50fachen Gewichts Waſſer um einen Grad erhöht.

Das ganze Kapitel von dem Meſſen der Wärmemengen führt den Namen Calorimetrie (calor Wärme, μετρεῖν meſſen).

§. 321. **Wärmequantität, welche beim Schmelzen gebunden wird.** 1) Miſcht man gleiche Gewichte zerſtoßenes Eis und Schnee von 0° und Waſſer von + 79° zuſammen, ſo erhält man das doppelte Gewicht an Waſſer von 0°. 2) Black brachte gleiche Gewichte Waſſer von 0° und Schnee von — 16° zuſammen. Es entſtand eine Miſchungstemperatur von 0°, und $\frac{1}{8}$ des Waſſers war zu Eis geworden.

Im erſten Verſuch hat die Temperatur des Waſſers um 79° abgenommen, es hat alſo ſo viel Wärme abgegeben, als erforderlich war, um daſſelbe von 0° bis auf 79° zu erwärmen. Dazu iſt aber für die Gewichtseinheit die Wärmemenge 79 nothwendig. Hat man demnach zu dem Verſuche ſowohl von dem Waſſer, als von dem Schnee, das Gewicht n genommen, ſo iſt die ganze Wärmemenge, welche das Waſſer verloren hat, = 79 n. Die Temperatur des Eiſes oder Schneees hat ſich nicht erhöht, ſondern es hat nur ſeinen Aggregatzuſtand verändert, es iſt geſchmolzen, und zwar ſeiner ganzen Maſſe nach. Wir ſchließen daraus, daß, um n Gewichtstheile Eis in tropfbar flüſſiges Waſſer überzuführen, das Eis die Wärmequantität 79 n in ſich aufnehmen muß. Brauchen aber n Gewichtstheile 79 n, ſo braucht ein Gewichtstheil 79. Man bezeichnet dies kurz dadurch, daß man ſagt, die gebundene oder latente Wärme des Waſſers ſei = 79, und drückt damit aus, daß man mit der zu dem Schmelzen des Eiſes erforderlichen Wärme daſſelbe Gewicht Waſſer um 79°, oder das 79fache Gewicht Waſſer um einen Grad habe erwärmen können. Eine Beſtätigung der hier entwickelten Anſicht erhalten wir auch durch den zweiten Verſuch. Wir ſehen hier $\frac{1}{8}$ des angewandten Waſſers zu Eis erſtarrt, während die übrigen $\frac{7}{8}$ ungeändert geblieben ſind, und die Temperatur der ganzen Quantität Schnee ſich um 16° erhöht hat. Waren wieder zu dem Verſuche von jedem Beſtandtheil n Gewichtstheile genommen worden, ſo war zur Temperaturerhöhung des Schneees die Wärmemenge 16 n erforderlich. Dieſe Wärmemenge kann aber nur von dem zu Eis erſtarrten Waſſer herrühren, denn es iſt ſchon früher (§. 309) gezeigt, daß bei dem Erſtarren die bei dem Schmelzen gebundene Wärme wieder frei wird. Da nun $\frac{1}{8}$ n Waſſer erſtarrt iſt, ſo wird $79 \times \frac{1}{8}$ n oder $15\frac{7}{8}$ n Wärme frei, was mit Rückſicht auf die möglichen Beobachtungsfehler eine hinreichende Uebereinſtimmung bewährt.

Von den übrigen Körpern ſind bis jetzt verhältnißmäßig nur wenige in Beziehung auf die Wärmemenge, welche ſie beim Schmelzen binden, unterſucht. Es ſind dies hauptſächlich die leichtflüſſigen Metalle, Zinn, Zink, Wismuth, Blei, aber die gewonnenen Reſultate ſind zu wenig zuverläſſig, als daß ſie hier weiter erwähnt werden könnten.

Digitized by Google

Der Umstand, daß Wasser eine große Menge gebundener Wärme enthält, und daß Eis erst eine solche Menge binden muß, um zu tropfbar flüssigem Wasser zu werden, ist in der Natur von großer Wichtigkeit. Ohne denselben würde im Winter, so oft die Temperatur über 0° stiege, alles Eis und aller Schnee plötzlich und zu gleicher Zeit geschmolzen, wovon sehr häufige, große Ueberschwemmungen die Folge sein würden, und andererseits würde, wenn die Temperatur unter 0° fiele, die Eisbildung sehr rasch vor sich gehen, die Gewässer, wie Flüsse, Ströme u. s. w., sich allzuplötzlich mit Eis bedecken, als daß für die Schifffahrt die nöthige Vorsorge getroffen werden könnte.

§. 322. **Wärmequantität, welche bei dem Sieden gebunden wird.** Man bringe Wasser in eine Retorte, verdampfe das Wasser durch eine untergesetzte Lampe, und leite die gebildeten Dämpfe in ein Gefäß, in welchem sich eine größere Menge Wasser von bekannter Temperatur befindet, so wird sich die Temperatur dieses Wassers bedeutend erhöhen.

Indem hier der Dampf in kälteres Wasser einströmt, kann er die Dampfgestalt nicht beibehalten, sondern wird wieder zu tropfbar flüssigem Wasser condensirt. Er muß daher auch alle die Wärme, welche er bei seiner Bildung gebunden hatte, wieder frei werden lassen, und diese gerade ist es, durch welche die Erwärmung des Wassers erfolgt. Soll diese Wärme nun quantitativ bestimmt werden, so muß man wissen: 1) wieviel Dampf condensirt wurde; 2) wieviel Wasser durch die frei gewordene Wärme erwärmt wurde, und 3) um wie viele Grade dasselbe seine Temperatur erhöht hat. Alle 3 Punkte erfährt man aber, wenn man das Wasser, in welchem die Condensation erfolgt, vor und nach dem Versuche abwiegt, und mittelst eines genauen Thermometers seine Temperatur am Anfange und am Schlusse des Versuches bestimmt. Die Gewichtszunahme des Wassers zeigt offenbar das Gewicht des condensirten Dampfes an. Genauere Resultate werden sich auf die angegebene Weise nicht erzielen lassen, da erst noch mehrere Fehlerquellen beseitigt werden müßten. Man hat daher eigene Apparate construirt, die aber hier, wo es nur darauf ankam, die Möglichkeit solcher Bestimmungen zu zeigen, nicht näher erläutert werden können. Wenn oben gesagt wurde, man müsse eine größere Menge Kühlwasser anwenden, so geschah dies deßwegen, weil, wie wir sogleich sehen werden, die gebundene Wärme der Dämpfe bedeutend ist, und weil außerdem verhütet werden muß, daß das Wasser sich nicht allzu stark erhitze, da es desto unvollkommner condensirt, je wärmer es ist. Da ein solcher Versuch immer einige Zeit dauert, so kann nicht verhütet werden, daß das Wasser während desselben Wärme an seine Umgebung abgibt. Um diesen Verlust möglichst zu beseitigen, wendet man Wasser an, dessen Temperatur mehrere Grade tiefer ist, als diejenige der Umgebung. Man läßt den Versuch auch nur so lange dauern, bis die Temperatur des Kühlwassers diejenige der Umgebung um eben so viele Grade übersteigt, indem man dann annehmen kann, daß das Wasser in der ersten Hälfte des Versuches ebenso viel Wärme von seiner Umgebung empfängt, als es in der letzten Hälfte an dieselbe abgibt. Aus den angestellten Untersuchungen hat man nun gefunden, daß die latente Wärme des Wasserdampfes bei der Temperatur, bei welcher er aus dem Wasser gebildet wird, also bei 100°, = 540 ist, daß aber dieser Werth von der Temperatur des Dampfes abhängig ist. In Be-

Digitized by Google

ziehung auf diese Abhängigkeit von der Temperatur galt früher das von Sharpe (1813) aufgestellte Gesetz, daß stets die Summe der latenten und freien Wärme des Wasserdampfes eine constante Größe, und zwar = 640 (540 + 100), sei. Dampf von der Temperatur von 50° hätte also die latente Wärme 590, und solcher von der Temperatur von 200° nur die latente Wärme 440. Allein Regnault hat nachgewiesen, daß die Summe der latenten und freien Wärme mit der Temperatur wächst, wenngleich auch nach ihm die latente Wärme des Wasserdampfes mit der Temperatur abnimmt (sie ist z. B. nach Regnault bei 50° = 571,6 statt 590 und bei 200° = 464, 3 statt 440; nun ist aber 571, 6+50 oder 621, 6 kleiner, als 464, 3 + 200 oder 664,3).

Auch die latente Wärme anderer Dämpfe hat man bestimmt, aber sie bei allen kleiner gefunden, als die latente Wärme des Wasserdampfes. So ist z. B. diejenige des Alkoholdampfes = 214, die des Schwefeläther dampfes = 90, die des Terpentinöldampfes = 74. Nach diesen Zahlen ist die latente Wärme der Dämpfe der Dichtigkeit derselben ziemlich nahe umgekehrt proportional. Werden daher gleiche Gewichtsmengen verschiedener Flüssigkeiten verdampft, so braucht zwar diejenige, deren Dampf die größte latente Wärme hat, auch die größte Wärmemenge, aber das gebildete Dampfvolumen ist auch bei derselben in demselben Verhältniß größer, als bei den übrigen. Daraus würde also folgen, daß dieselbe Wärmemenge aus allen Flüssigkeiten dasselbe Dampfvolumen erzeuge.

Daß der Wasserdampf eine so große Menge gebundener Wärme enthält, und zu seinem Bestehen enthalten muß, ist ebenfalls in dem Haushalte der Natur von bedeutender Wichtigkeit. Denn müßte nicht bei der Verdampfung so viele Wärme gebunden werden, so würde die Verdunstung des Wassers an der Oberfläche der Erde unvergleichlich rascher erfolgen, und ließe nicht der Dampf in der Atmosphäre bei seiner Condensirung durch Abnahme der Temperatur so viele Wärme frei werden, wodurch die Temperatur der Umgebung erhöht, und anderem Dampfe die Möglichkeit gegeben wird, die Dampfgestalt beizubehalten, so müßten bei einer Temperaturerniedrigung die in der Atmosphäre enthaltenen Wasserdämpfe stets in großer Menge als Regen niederfallen. Auch hat man von dem Umstande, daß der Wasserdampf die meiste gebundene Wärme enthält, eine praktische Anwendung in der Dampfheizung gemacht. Sie wird hauptsächlich angebracht, wo größere Räume zu erwärmen sind. Man verdampft dann in einem niedrigen Theile des Gebäudes, z. B. im Keller, das Wasser in einem Kessel, und leitet die Dämpfe durch eiserne Dampfleitungsröhren unter die Fußböden der Zimmer. Der Dampf condensirt sich nun in den Röhren zu Wasser. Dadurch wird seine gebundene Wärme frei, und theilt sich der Luft mit. Den Röhren gibt man eine schiefe Lage, damit stets das condensirte Wasser wieder in den Kessel zurückfließen kann.

§. 323. **Wärmecapacität, specifische Wärme, relative Wärme.** 1) Mischt man 1 Pfund Wasser von 12° mit einem Pfund Wasser von 30°, so bekommt die Mischung eine Temperatur von 21°. 2) Mischt man 2 Pfund Wasser von 12° mit 5 Pfund Wasser von 30°, so hat die Mischung eine Temperatur von 24⅔°. 3) Mischt man 1 Pfund Wasser von 7° mit 1 Pfund Quecksilber von 109°, so zeigt die Mischung nur eine Temperatur von 10°. Oder mischt man gleiche Gewichtstheile Gold von 100° und Wasser von 0°, so ist die gemeinsame Temperatur nur 5°.

Digitized by Google

Gehen wir von dem Grundsatze aus, daß stets dieselbe Wärmemenge nöthig sei, um dieselbe Wirkung hervorzubringen, so zeigen die Versuche 1 und 2 bei näherer Betrachtung Nichts Auffallendes. Was nämlich zunächst den ersten Versuch betrifft, so ist 21 das arithmetische Mittel von 30 und 12. Das eine Wasser hat 9° an seiner Temperatur verloren, das andere 9° gewonnen. Die Temperatur des letzteren Wassers kann aber offenbar nur durch die Wärme gestiegen sein, welche das erstere Wasser abgegeben hat. Im zweiten Versuche haben die 5 Pfund Wasser an ihrer Temperatur $5\frac{1}{2}$° verloren, die 2 Pfund dagegen $12\frac{1}{2}$° gewonnen. Wenn aber 5 Pfund sich um $5\frac{1}{2}$° abkühlen, so geben sie die Wärmemenge $5 \times 5\frac{1}{2}$ oder $25\frac{1}{2}$ ab, und wenn 2 Pfund um $12\frac{1}{2}$° wärmer werden, so hat auf sie die Wärmemenge $2 \times 12\frac{1}{2}$ oder $25\frac{1}{2}$ eingewirkt. Es ist also auch hier die Erwärmung nur durch diejenige Wärme erfolgt, welche die 5 Pfund abgegeben haben. Daß sich aber dem Wasser ganz entsprechend in dieser Beziehung auch andere Körper verhalten müssen, ist einleuchtend. Es fragt sich nur, wie man eine Formel finden könne, nach welcher man für alle Fälle die Temperatur der Mischung berechnen kann. Nun muß sich offenbar alle freie Wärme der beiden Theile, da am Ende des Versuchs das Ganze dieselbe Temperatur zeigt, gleichmäßig auf die ganze Masse vertheilen. Bringt man daher von irgend einem Körper die Masse m von der Temperatur t mit der Masse m, von der Temperatur t, zusammen, so muß die Mischung eine Temperatur $T = \frac{m\,t + m,\,t,}{m + m,}$ zeigen. Diese Formel heißt die Richmann'sche Regel, weil sie zuerst von Richmann, von welchem schon im §. 119 erwähnt ist, daß er bei Beobachtungen der Luftelectricität von dem Blitze erschlagen worden sei, aufgestellt wurde. Bringt man nun im ersten Versuche gleiche Gewichtstheile zusammen, so ist $m = m$, und also $T = \frac{m\,t + m\,t,}{m + m} = \frac{m\,(t + t,)}{2\,m} = \frac{t + t,}{2}$ dem arithmetischen Mittel der beiden Temperaturen. Sobald wir aber wie im dritten Versuche verschiedene Körper zusammenbringen, so läßt uns die Richmann'sche Regel ganz im Stiche. Wir sehen das Quecksilber seine Temperatur um 99 Grade erniedrigen, während die Temperatur eines gleichen Gewichtes Wasser nur um 3 Grade steigt, oder bei dem Golde die Temperatur um 95° fallen, während diejenige der Wassers um 5° steigt. Es geht aber daraus hervor, daß die Wärme, welche ein bestimmtes Gewicht Wasser um 3 Grade erwärmt, dasselbe Gewicht Quecksilber um 99 Grade erwärmt, und daß die Wärme, welche Wasser um 5° erwärmt, dasselbe Gewicht Gold um 95° erwärmt, oder daß Wasser zu gleicher Erwärmung 33 mal mehr Wärme, als Quecksilber, und 19 mal mehr Wärme, als Gold, nöthig hat. Man schreibt demnach den verschiedenen Körpern eine verschiedene Wärmecapacität (capacitas die Fähigkeit, in sich aufnehmen zu können) zu, und sagt z. B., die Wärmecapacität des Wassers sei 33 mal größer, als die des Quecksilbers, und 19 mal größer, als die des Goldes. Vergleicht man aber diejenigen Wärmemengen mit einander, welche erforderlich sind, um gleiche Gewichte verschiedener Körper um gleichviel zu erwärmen, oder, was dasselbe ist, um die Gewichtseinheit derselben um 1° zu erwärmen, so kommt man

Digitized by Google

zu dem Begriff der *specifischen Wärme*, die eben durch die Verhältnißzahlen ausgedrückt wird, welche sich aus dieser Vergleichung ergeben. Auch hier ist es wieder wünschenswerth, alle Körper mit einem einzigen zu vergleichen. Man hat auch dazu das Wasser wegen seiner bedeutenden Wärmecapacität gewählt, dessen specifische Wärme demnach = 1 gesetzt wird. Es ist also die specifische Wärme des Queckſilbers = $^{3}/_{5}$ oder 0,0303 ... und diejenige des Goldes = $^{1}/_{5}$ oder 0,0526 ... Die geringe specifische Wärme des Queckſilbers ist ein anderer Umstand, der es ebenfalls zur Füllung der Thermometer empfiehlt, da ihm verhältnißmäßig nur wenig Wärme zugeführt zu werden braucht, um seine Temperatur zu erhöhen, und sich demgemäß auch auszudehnen. Aus der gegebenen Auseinandersetzung geht hervor, daß specifische Wärme und Wärmecapacität innig mit einander zusammenhangen, ja daß beide vollständig einander proportional sind, und durch dieselben Zahlen bezeichnet werden können, und daß der Unterschied nur darin zu suchen ist, daß man unter der Wärmecapacität eine Eigenschaft der Körper zu verstehen hat, während die specifische Wärme sich auf die Wärmemengen selbst bezieht. Vergleicht man endlich diejenigen Wärmemengen mit einander, welche zu einer gleichen Temperaturerhöhung eines gleichen Volumens verschiedener Körper erforderlich sind, so erhält man den Begriff der *relativen Wärme*. Da nun ein Körper in einem gegebenen Volumen so vielmal mehr Masse, und also auch Gewicht hat, als ein anderer, so vielmal sein specifisches Gewicht größer ist, als das des andern Körpers, so *wird die relative Wärme eines Körpers gefunden, wenn man seine specifische Wärme mit seinem specifischen Gewichte multiplicirt*. Es ist z. B. die relative Wärme des Queckſilbers = 0,0303 ... × 13,6 = 0,4120 ..., diejenige des Goldes = 0,0526 ... × 19,1 = 1,0046 ..., also fast derjenigen des Wassers gleich.

§. 324. **Verschiedene Methoden, die specifische Wärme der Körper zu bestimmen; Mischungsmethode.** Um die specifische Wärme der Körper zu bestimmen, hat man verschiedene Methoden, da nicht jede bei jedem Körper gleich gut angewandt werden kann. Für feste und tropfbar flüssige Körper gibt es hauptsächlich 3 Methoden, die wir jetzt etwas näher kennen lernen wollen, nämlich 1) *die Mischungsmethode*, 2) die *Methode des Eisschmelzens* und 3) die *Abkühlungsmethode*.

Die *Mischungsmethode*, die wir bei dem dritten Versuche des vorigen Paragraphen schon in Anwendung gebracht haben, besteht im Wesentlichen darin, daß man von dem auf seine specifische Wärme zu prüfenden Körper eine genau abgewogene Menge nimmt, diese auf eine bestimmte Temperatur erwärmt, und dann in ein Gefäß mit Wasser bringt, das vorher ebenfalls genau abgewogen, und dessen Temperatur bestimmt wurde. Man wartet dann, bis das Gleichgewicht der Wärme hergestellt ist, d. h. bis der Körper und das Wasser gleich warm sind. Man sieht dies daraus, daß ein in das Wasser gehaltenes Thermometer nicht mehr steigt. Diese Temperatur bemerkt man sich ebenfalls. Aus den 5 bekannten Größen, nämlich 1) dem Gewichte m des Körpers, 2) der Temperatur t desselben, als er in das Wasser gebracht wurde, 3) dem Gewichte m' des Wassers, 4) der Temperatur t' des Wassers zu Anfange des Versuches, und 5) der Temperatur T der Mischung läßt sich nun die specifische Wärme

Digitized by Google

des Körpers durch folgende Betrachtung finden. Da das Wasser zu Anfang des Versuchs t' und zu Ende T Grade warm war, so hat es seine Temperatur um T — t' Grade erhöht. Zu einer solchen Erhöhung würde für die Gewichtseinheit die Wärme T — t' erforderlich gewesen sein; für das Gewicht m' ist also die m'fache Menge oder m' (T — t') erforderlich. Die Temperatur des zu untersuchenden Körpers hat sich erniedrigt, und zwar um t — T Grade. Bezeichnet nun x die noch unbekannte specifische Wärme des Körpers, so gibt derselbe, wenn sich die Gewichtseinheit desselben um 1 Grad abkühlt, die Wärmemenge x ab, wenn sich also das Gewicht m um 1 °abkühlt, die Wärmemenge m x, und wenn sich dieses Gewicht um t — T Grade abkühlt, die Wärmemenge m x (t — T). Da aber grade die abgegebene Wärme des Körpers die Erwärmung des Wassers hervorgebracht hat, so muß offenbar $m' (T - t') = m x (t - T)$ und $x = \frac{m' (T - t')}{m (t - T)}$ sein, d. h. die specifische Wärme des Körpers wird gefunden, wenn man sein Gewicht mit seiner Temperaturerniedrigung multiplicirt und mit diesem Producte in das Product dividirt, das man erhält, wenn man das Gewicht des Kühlwassers mit seiner Temperaturerhöhung multiplicirt.

Bei Versuchen nach der Mischungsmethode darf man jedoch nicht vergessen, daß nicht nur das Wasser sich erwärmt, sondern auch das Gefäß, in welchem sich dasselbe befindet, und zwar nimmt auch dieses die Temperatur T an. Es wird daher auch nöthig, das Gewicht des Gefäßes und die specifische Wärme des Körpers, aus welchem dasselbe gemacht ist, zu kennen. Das Product beider zeigt an, eine wie große Wassermasse bei der Erwärmung durch das Gefäß vertreten werde. Man zählt daher dieses Product dem bei dem Versuche gebrauchten Wasser hinzu. Um ferner dem Fehler, daß während des Versuches das Wasser auch Wärme an die umgebende Luft abgibt, möglichst zu begegnen, richtet man den Versuch so ein, daß die Erwärmung des Wassers nicht sehr bedeutend wird, da offenbar der Verlust desto größer wird, je größer die Differenz in der Temperatur des Wassers und der Luft ist. Man nimmt deßwegen die Menge des Kühlwassers nicht zu klein, da ja, je größer diese ist, desto geringer die Erwärmung ausfällt. Man wendet zu demselben Behufe auch wieder das Verfahren an, das schon in §. 322 beschrieben wurde, nämlich, daß man das Wasser vor dem Versuche um ungefähr so viele Grade unter die Temperatur der umgebenden Luft abkühlt, als es sich während des Versuches über diese Temperatur erwärmt. Daß man nach dieser Methode nicht die specifische Wärme derjenigen Körper finden könne, die in Wasser löslich sind, oder die sich in Berührung mit dem Wasser erhitzen oder erkalten, ist einleuchtend. Für Körper, welche in Wasser löslich sind, muß man das Verfahren dahin abändern, daß man sie statt in das Wasser in eine andere Flüssigkeit, in welcher sie nicht gelöst werden, z. B. Oel, bringt. Ist dann die specifische Wärme der angewandten Flüssigkeit bekannt, so hat man die Zahl, welche der Versuch ergibt, und welche die specifische Wärme des Körpers im Verhältniß zum Oele bezeichnet, nur noch mit der specifischen Wärme der Flüssigkeit zu multipliciren. Das Product gibt die specifische Wärme des Körpers auf diejenige des Wassers als Einheit bezogen.

Ist aber die specifische Wärme eines Körpers bekannt, so läßt sich

Digitized by Google

auch irgend eine der andern Größen in obiger Gleichung als unbekannt ansehen, und durch die anderen bestimmen. Gesetzt es sollte t gefunden werden, so gibt die Entwicklung $t = \frac{m'(T - t')}{m x} + T$, d. h. die ursprüngliche Temperatur des in das Wasser gebrachten Körpers ist gleich dem Quotienten aus dem Producte aus Masse und Temperaturerhöhung des Kühlwassers dividirt durch das Product aus Masse und specifischer Wärme des Körpers, vermehrt um die Mischungstemperatur. Pouillet hat gelehrt, wie man hiervon eine Anwendung machen könne zur Bestimmung sehr hoher Temperaturen (vergleiche §. 302). Er nahm eine Platinkugel, erhitzte sie in dem Feuer eines Ofens, und löschte sie dann in einer größeren Wassermasse ab. Es ist bei diesem Verfahren nur der Umstand störend, daß nach Pouillet's eigenen Versuchen die specifische Wärme des Platins mit der Temperatur wächst, und zwar so, daß zwischen 0° und 1200° die Werthe von 0,0335 bis zu 0,0382 sich ändern. Da nun die Temperatur noch nicht bekannt ist, so weiß man auch nicht, welchen Werth für die specifische Wärme man zu setzen habe. Man sucht daher erst einen Näherungswerth, indem man den kleinsten Werth für die specifische Wärme in die Formel einsetzt. Das Resultat ist dann offenbar zu groß, zeigt aber wenigstens, welchen Werth für x man zu nehmen habe, um dann das richtige Resultat zu finden. Pouillet bestimmte auf diese Weise den Schmelzpunkt des Eisens zu 1500 bis 1600°.

§. 325. **Fortsetzung; Methode des Eisschmelzens.** Bei der Methode des Eisschmelzens bedient man sich eines eigenen, von Lavoisier und Laplace (1777) construirten Apparates, des s. g. Eiscalorimeters. Es besteht derselbe aus 3 verschieden großen, in einander steckenden Gefäßen von Eisenblech, die in gehöriger Entfernung von einander gehalten werden. In das innerste und kleinste Gefäß, dessen Wände siebförmig durchlöchert sind, bringt man den Körper, dessen specifische Wärme gefunden werden soll, und der zuvor bis zu einer bestimmten Temperatur erhitzt worden ist. In den Zwischenraum zwischen diesem und dem nächsten Gefäße bringt man fein zerstoßenes Eis, das eben durch die Wärme, welche der Körper abgibt, wenigstens theilweise, geschmolzen werden soll. Den Zwischenraum endlich zwischen dem mittelsten und äußersten Gefäße füllt man ebenfalls mit Eisstücken oder Schnee an, um die Wärme der äußeren Luft von dem Eise in dem mittleren Gefäße abzuhalten. Aus dem mittleren Gefäße sowohl, wie aus dem äußersten kann durch einen eigenen Hahn das gebildete Wasser abgelassen werden. Der Versuch dauert so lange, bis kein Eis mehr geschmolzen wird, bis also der in das innerste Gefäß gebrachte Körper sich selbst bis auf 0° abgekühlt hat. Das aus dem geschmolzenen Eise erzeugte Wasser wird dann genau abgewogen, sein Gewicht sei m', während das Gewicht des zu prüfenden Körpers m und seine Temperatur, als er in das Gefäß gebracht wurde, t sei. Um aber m' Eis zu schmelzen, ist nach §. 321 eine Wärmemenge 79 m' erforderlich. Wenn x die specifische Wärme des Körpers bedeutet, so bedarf eine Gewichtseinheit desselben, um sich um einen Grad zu erwärmen, die Wärmemenge x und gibt diese demnach auch bei der Abkühlung um einen Grad ab; das Gewicht m gibt also in diesem Falle m x ab, und wenn es sich in diesem Versuche

Digitized by Google

um t Grade abkühlt, gibt es die Wärmemenge $m x t$ ab. Da aber gerade die abgegebene Wärme das Eis geschmolzen hat, so ist $m x t = 79 m'$ und $x = \frac{79 m'}{m t}$, d. h. die specifische Wärme des Körpers ist gleich dem Quotienten aus dem 79fachen Gewichte des geschmolzenen Eises dividirt durch das Product aus dem Gewichte des Körpers in seine anfängliche Temperatur. Ist der zu prüfende Körper ein fester Körper, so geschieht die Erwärmung desselben gewöhnlich in heißem Wasser oder heißem Oele, weil dadurch die Bestimmung seiner Temperatur erleichtert wird. Schnee darf man nicht in das mittlere Gefäß bringen, weil dieser das durch das Schmelzen erzeugte Wasser theilweise aufsaugen, und dadurch nicht vollständig aus dem Hahn abfließen lassen würde. Sollen tropfbare Flüssigkeiten nach ihrer specifischen Wärme im Eiscalorimeter untersucht werden, so bringt man sie in einem Metallgefäße, dessen specifische Wärme bekannt ist, in das innerste Gefäß des Calorimeters. Wird dann kein Eis mehr geschmolzen, so zieht man von dem Gewichte des geschmolzenen Eises so viel ab, als durch die Abkühlung des Metallgefäßes geschmolzen werden mußte.

§. 326. **Fortsetzung; Abkühlungsmethode.** Die dritte Methode, die specifische Wärme der Körper zu bestimmen, ist die von Tobias Mayer 1796 zuerst angegebene und von Dulong und Petit verbesserte Abkühlungsmethode. Sie beruht auf der Betrachtung, daß ein warmer Körper unter übrigens gleichen Umständen sich desto schneller bis zur Temperatur seines Mittels abkühlt, je kleiner seine specifische Wärme ist, je kleiner also die Wärmemenge ist, die er bei der Abkühlung abgibt. Man fülle mit den zu untersuchenden Körpern ein polirtes silbernes Gehäuse ganz an (sind es feste Körper, so wendet man sie zu diesem Behufe in Pulverform an), erwärmt sie in diesem Gehäuse um 15 bis 20°, bringt sie dann in einen luftleeren Raum, und beobachtet, wieviel Zeit sie brauchen, um sich um 5° abzukühlen. Gesetzt der eine Körper von dem Gewichte m und der specifischen Wärme x habe dazu die Zeit z gebraucht, der andere Körper von dem Gewichte m' und der specifischen Wärme x' die Zeit z'. Dann hat der erste Körper die Wärmemenge $5 m x$ und der zweite die Wärmemenge $5 m' x'$ abgegeben. Wird nun angenommen, daß das Silbergefäß in gleichen Zeiten immer gleichviel Wärme ausstrahle, so müssen sich diese Wärmemengen wie die Abkühlungszeiten verhalten, oder es ist $5 m x : 5 m' x' = z : z'$. War der erste Körper Wasser, dann ist $x = 1$, und wir haben $m : m' x' = z : z'$ oder $x' = \frac{m}{m'} \times \frac{z'}{z}$. Da aber m und m' Gewichte gleicher Volumina bedeuten, so verhalten sie sich auch wie die specifischen Gewichte der Körper, und man kann demnach, wenn s das specifische Gewicht des zweiten Körpers bedeutet, und der erstere Körper wieder Wasser ist, $\frac{1}{s}$ statt $\frac{m}{m'}$ setzen. Dann ist aber $x' = \frac{z'}{s z'}$, d. h. die specifische Wärme des Körpers ist gleich der Abkühlungszeit des Wassers dividirt durch das Product aus der Abkühlungszeit des Körpers multiplicirt mit dem specifischen Gewichte desselben. Die Resultate, welche nach dieser Methode gewonnen werden, können aber nicht als genau und zuverlässig angesehen werden, weil vorausgesetzt wird, daß

Digitized by Google

das Erkalten durch die ganze Substanz gleichmäßig vor sich gehe, und weil noch nicht bewiesen ist, daß alle Körper mit gleicher Leichtigkeit ihre Wärme an das Silber abgeben. Jedenfalls sollte sie nur für die Vergleichung solcher Körper in Anwendung kommen, welche die Wärme leicht abgeben.

§. 327. **Fortsetzung; Bestimmung der specifischen Wärme der Gase.** Für die Bestimmung der specifischen Wärme der Gase sind die drei besprochenen Methoden nicht geeignet. Man hat aber zu diesem Zwecke eine Abänderung der Mischungsmethode ersonnen, die darin besteht, daß die Gase nicht in unmittelbare Berührung mit dem Kühlwasser gebracht werden, sondern daß man sie durch eine schlangenförmig gewundene Röhre gehen läßt, die sich in einem mit dem Kühlwasser gefüllten Gefäße befindet. Das Gas wird in einem Gasometer, der mit heißem Wasser umgeben ist, durch letzteres bis zu einer bestimmten Temperatur erwärmt, und dann unter einem bestimmten Drucke, der in dem Gasometer stets regulirt und gleich erhalten wird, in das Schlangenrohr einströmen lassen. Wegen des Verlustes an die umgebende Luft wendet man wieder die schon öfter erwähnte Vorsicht an, daß man das Kühlwasser so viele Grade unter die Lufttemperatur abkühlt, als man es durch das Gas über dieselbe erwärmen will. Aus dem Gewichte des Wassers und seiner Temperaturzunahme, sowie aus dem Gewichte des durchgeströmten Gases und seiner Temperaturabnahme wird dann die specifische Wärme des Gases ebenso berechnet, wie in §. 324 gezeigt wurde. Da hier die Gase stets unter demselben Druck erhalten werden, aber sich ausdehnen können, so findet man auf diese Weise *ihre specifische Wärme bei constantem Druck und veränderlichem Volumen*. Es entsteht nun die Frage, ob sie sich gleich bleibe, wenn man den Gasen ein constantes Volumen gibt, d. h. wenn man sie bei der Erwärmung an der freien Ausdehnung hindert (daß in diesem Falle der Druck sich ändert, ist wegen der vermehrten Spannkraft klar). Die folgende Betrachtung zeigt, daß sie bei constantem Volumen größer sein muß. Das Gas werde um t Grade erwärmt, während es sich ausdehnen kann, und unter demselben Drucke bleibt. Wird es dann auf sein erstes Volumen wieder durch größeren Druck zurückgeführt, so wird wegen der eintretenden Verdichtung (§. 351) noch eine Quantität Wärme frei, die eine abermalige Erwärmung des Gases um t' Grade hervorruft, so daß seine Temperatur jetzt um $t + t'$ Grade über seine ursprüngliche Temperatur gestiegen ist, ohne daß ihm doch bei der letzten Erwärmung neue Wärme zugeführt worden wäre. Es muß sich demnach die specifische Wärme bei constantem Druck zu derjenigen bei constantem Volumen verhalten wie $t : t + t'$. Bis jetzt kennt man aber noch kein Mittel, die Größe von t' genau zu bestimmen.

§. 328. **Gesetz von Dulong und Petit.** Nachdem die specifische Wärme von einer ganzen Reihe von Körpern bestimmt war, haben Dulong und Petit das wichtige Gesetz aufgefunden, *daß bei den chemisch einfachen Körpern oder Elementen die specifischen Wärmen sich umgekehrt verhalten, wie die Atomgewichte derselben*, oder, in andern Worten, *daß das Product aus der specifischen Wärme eines einfachen Stoffes in sein Atomgewicht stets eine constante Zahl sei*. Die durch die Versuche gefundenen Zahlen zeigen zwar keine volle Uebereinstimmung, ihr arithmetisches Mittel beträgt, wenn

Digitized by Google

das Atomgewicht des Sauerstoffes = 1 gesetzt wird, 40, 57, (wird das Atomgewicht des Wasserstoffes = 1 gesetzt, so beträgt dieses Mittel 3, 2), und die Zahlen selbst liegen zwischen 37,012 (Phosphor) und 45,034 (Wismuth). Aber diese Abweichungen können dessenungeachtet nur als gering angesehen werden, wenn man bedenkt, daß der eine Factor des Products, das Atomgewicht, von 152, 88 (Kohle) bis zu 1330, 37 (Wismuth) sich ändert. Auch sind die Atomgewichte noch nicht alle so festgestellt, daß man behaupten dürfte, sie seien absolut richtig, und selbst die specifische Wärme ist, wie wir in dem folgenden Paragraph sehen werden, in verschiedenen Zuständen des Körpers auch einer Veränderung unterworfen, so daß schon deßhalb die Resultate nur dann vollkommen genau sein könnten, wenn die specifische Wärme der verschiedenen Körper nur unter ganz denselben Verhältnissen bestimmt worden wäre. Eine fernere Bestätigung hat das mitgetheilte Gesetz auch noch durch die Erweiterung gewonnen, die zuerst von Neumann ausgesprochen, und später von Regnault bestätigt worden ist, nämlich, daß auch bei allen zusammengesetzten Körpern von gleicher atomistischer und ähnlicher chemischer Zusammensetzung die Producte aus den specifischen Wärmen in die Atomgewichte eine constante Zahl sei. Sie fanden z. B. dieses Product für Oxyde, in welchen 1 Theil Basis mit 1 Theil Sauerstoff verbunden ist, = 70, 52, für solche Oxyde, in welchen auf 2 Theile Basis 3 Theile Sauerstoff kommen, = 169,73 u. s. w. Da das Product aus der specifischen Wärme und dem Atomgewichte offenbar diejenige Wärmemenge ist, welche ein Atom braucht, um sich um 1° zu erwärmen, so folgt aus unserm Gesetze auch, daß die Atome aller Elemente sowohl, als auch die Atome aller atomistisch gleich und chemisch ähnlich zusammengesetzter Körper bei gleichen Temperaturen auch gleichviel Wärme enthalten. Daß uns ferner in unserem Gesetze, sobald die specifische Wärme eines einfachen Stoffes festgestellt ist, ein Mittel geboten wird, das Atomgewicht desselben zu finden, oder, falls ein solches schon bekannt sein sollte, dieses auf seine Richtigkeit zu prüfen, ist klar.

Es verdient hier ferner noch erwähnt zu werden, daß aus den Versuchen Regnault's auch hervorgeht, daß bei Legirungen von Metallen die specifische Wärme einer Legirung stets dem arithmetischen Mittel aus den specifischen Wärmen der einzelnen Metalle gleich ist.

§. 329. **Aenderungen der specifischen Wärme.** Genauere Versuche über die specifische Wärme haben ferner dargethan, daß sie nicht einmal bei einem und demselben Körper unter allen Umständen gleich bleibt, sondern daß sie auch abhängig ist, sowohl von dem Dichtigkeitszustande, als auch von der Temperatur des Körpers. So haben nach Regnault die verschiedenen Formen, in welchen der Kohlenstoff vorkommt (thierische Kohle, Holzkohle, Coaks, Steinkohle, Anthracit, Graphit, Diamant) alle eine andere specifische Wärme; während diejenige der thierischen Kohle = 0,2685 ist, ist die des Diamantes nur = 0,14687 und die der übrigen Kohlenarten liegen zwischen diesen beiden Werthen. Sie sind aber oben geordnet nach den verschiedenen Graden ihrer Dichte. Die thierische Kohle ist die am wenigsten dichte, der Diamant die dichteste. Wir sehen also hier die specifische Wärme mit der Dichte abnehmen. Die Kohle ist aber nicht etwa der einzige Körper, von welchem dies nachgewiesen ist,

Digitized by Google

ſondern auch bei andern Körpern findet daſſelbe ſtatt. So wird nach demſelben Phyſiker die ſpecifiſche Wärme des Kupfers merklich kleiner, wenn es durch Hämmern dichter gemacht wird. Er fand ſie bei ſchmiedbarem Kupfer = 0,09478, bei gehämmertem dagegen nur = 0,09346. Schon aus dieſen Erfahrungen läßt ſich erwarten, daß auch die Temperatur einen ganz ähnlichen Einfluß auf die ſpecifiſche Wärme ausüben müſſe, da durch ſie ebenfalls der Dichtigkeitszuſtand der Körper verändert wird. Da bei ſteigender Temperatur die Dichte abnimmt, ſo war zu vermuthen, daß die ſpecifiſche Wärme mit der Temperatur wachſe. Die Verſuche mit verſchiedenen Körpern, feſten ſowohl als tropfbar flüſſigen, haben dieſe Vermuthung auch vollſtändig beſtätigt. Wird die ſpecifiſche Wärme des Eiſens z. B. durch Abkühlung von 100° auf 0° beſtimmt, ſo iſt ſie gleich 0,1098, wird ſie aber durch Abkühlung von 300° auf 0° gefunden, ſo erhält man den Werth 0,1218, und während ſie für Waſſer bei 0° = 1 iſt, iſt ſie bei 100° = 1,0050 und bei 230° = 1,0204.

Fünftes Kapitel.

Von der Fortpflanzung der Wärme.

§. 330. **Verſchiedene Arten der Fortpflanzung.** 1) Wenn man einen Metallſtab mit dem einen Ende in ein Feuer hält, ſo wird er nach einiger Zeit auch am anderen Ende erwärmt. Doch dauert dies um ſo länger, je länger der Stab iſt. 2) Wenn man ſich einem ſtarken Feuer nähert, ohne daß ſich zwiſchen uns und dem Feuer ein feſter Körper befindet, ſo empfinden wir in unſerem Geſichte eine brennende Hitze. Sobald man aber einen Schirm vorhält, ſei es eine Metallplatte oder eine hölzerne oder Pappſcheibe, ſo verſchwindet dieſe Hitze augenblicklich wieder.

Da wir bei der Erfahrung in 1 nur an denjenigen Stellen der Hand die Wärme empfinden, welche mit dem Metallſtabe in Berührung kommen, ſo muß ſich die Wärme des Feuers durch das Metall fortgepflanzt haben, und zwar, weil die Erwärmung des anderen Endes deſto ſpäter eintritt, je länger der Stab iſt, von Theilchen zu Theilchen. Dieſe Art der Fortpflanzung, bei welcher die Wärme einer Wärmequelle an die unmittelbar ſie umgebenden Körper tritt, und in dieſen immer von einem Theilchen an das nächſte abgegeben wird, heißt die Leitung der Wärme. Anders verhält ſich die Sache in der 2ten der mitgetheilten Erfahrungen. Da befindet ſich zwiſchen dem Geſichte und dem Feuer die Luft, und doch kann die Hitze, welche wir empfinden, nicht von den unſer Geſicht berührenden Lufttheilchen herrühren, denn ſonſt könnte ſie offenbar nicht wieder in demſelben Augenblicke verſchwinden, in welchem ein Schirm zwiſchen unſer Geſicht und das Feuer tritt. Sie muß alſo durch das Feuer ſelbſt unmittelbar hervorgerufen worden ſein, und die Wärme muß ſich durch die Luft bis zu unſerm Geſichte fortgepflanzt haben, ohne zugleich die dazwiſchen liegenden Lufttheilchen gleichmäßig erwärmt zu haben. Dieſe Art der Fortpflanzung nennt man die Strahlung der Wärme.

Digitized by Google

A. Von der Fortpflanzung der Wärme durch Leitung.

§. 331. **Wärmeleitung durch feste Körper.** 1) Man nehme drei gleich lange und gleich dicke Stäbe, einen von Metall, einen von Holz und einen von Glas. Wird der Metallstab mit dem einen Ende in das Feuer gehalten, so wird er auch bald an dem anderen Ende so heiß, daß man ihn nicht mehr halten kann, ohne sich zu verbrennen. Anders dagegen ist es mit dem Holzstab, den die Flamme selbst fast bis zu dem anderen Ende verzehrt haben kann, ohne daß an diesem Ende eine besondere Zunahme der Temperatur verspürt wird, und auch den Glasstab kann man ungestraft ziemlich nahe an der Stelle, wo er glüht, anfassen. 2) In die eine Seitenwand eines Kastens von Blech sind mehrere aus verschiedenen Substanzen verfertigte Stäbchen von gleichem Durchmesser eingesteckt, und alle mit einer gleich dicken Schicht von Wachs überzogen. Wird dann in den Kasten siedendes Wasser oder heißes Oel gegossen, so wird man finden, daß der Wachsüberzug auf den verschiedenen Stäbchen verschieden weit abschmilzt. 3) Werden in einen geschlossenen Raum verschiedene Körper von ganz verschiedener Temperatur gebracht, und nach einiger Zeit mittelst eines Thermometers ihr Wärmezustand untersucht, so zeigen sie doch alle eine gleiche Temperatur. 4) Nimmt man die Kugel eines Thermometers in die Hand, dann steigt das Quecksilber Anfangs ziemlich schnell, dann immer langsamer, bis es endlich stille steht.

In dem ersten Versuche sehen wir die Wärme, welche dem einen Ende des Metallstabes zugeführt wird, sich rasch durch den ganzen Stab verbreiten, und bis an das andere Ende vordringen. Ganz anders dagegen ist es bei dem Holzstab und dem Glasstab. Wir lernen daher aus dem Versuche ein verschiedenes Verhalten der Körper auch in Beziehung auf die Fortpflanzung der Wärme durch ihre Theile, d. h. in Beziehung auf die Wärmeleitung kennen. Nicht immer tritt indeß die Verschiedenheit der Körper in dieser Hinsicht so grell hervor, wie hier bei Holz oder Glas und Metall. Würden wir z. B. eine Eisen-, eine Zink- und eine Zinnstange nehmen, so würden wir wohl schwerlich eine sichere Unterscheidung derselben mit Rücksicht auf ihre Wärmeleitung durch unser Gefühl bewerkstelligen können. In diesem Falle können wir uns mit Vortheil des zuerst von Ingenhouß angegebenen, unter 2 beschriebenen Apparates bedienen. Hier werden die Enden der zu vergleichenden Körper derselben Temperatur ausgesetzt, und da das Wachs nur an denjenigen Stellen der Stangen schmelzen kann, welche bis zu dem Schmelzpunkte des Wachses erwärmt sind, so müssen offenbar die Entfernungen, bis zu welchen auf den verschiedenen Stäben das Wachs geschmolzen ist, ihrem Leitungsvermögen proportional sein. Je nachdem sich nun die Wärme in einem Körper schnell oder langsam ausbreitet, je nachdem nennt man den Körper einen guten oder schlechten Wärmeleiter. Die Versuche haben gelehrt, daß von allen Körpern die Metalle die besten Wärmeleiter sind, und daß sich unter diesen namentlich wieder Silber und Kupfer auszeichnen, daß dagegen Holz, Kohle, Asche, Eis, Schnee, Stroh, Seide, Haare, Federn, Wolle, überhaupt die lockeren Körper, den schlechtesten Wärmeleitern zugerechnet werden müssen. Die Kenntniß von der verschiedenen Wärmeleitungsfähigkeit der Körper ist aber von großer Wichtigkeit, da wir im Leben Gelegen-

Digitized by Google

heiten genug haben, häufige Anwendungen davon zu machen. Will man einem Körper seine Temperatur so viel als möglich erhalten, so umgibt man ihn mit schlechten Wärmeleitern; will man aber bewirken, daß die Wärme recht rasch an andere Körper übergehen soll, so kommen gute Wärmeleiter in Anwendung. So wählen wir unsere Kleider und unsere Betten aus schlechten Wärmeleitern, nicht damit sie uns Wärme zuführen, sondern daß sie die Wärme unseres Körpers zusammenhalten, und ihre Verbreitung an die Umgebung verhindern. So aber wendet man auch zur Bedeckung der Eisgruben schlechte Wärmeleiter an, um die Sonnenhitze nicht von Außen bis zu dem Eise durchdringen zu lassen. In der Küche verdienen vor allen Töpfen die kupfernen und nach ihnen die eisernen den Vorzug, da sie die Wärme des Feuers viel rascher an die Flüssigkeiten in den Töpfen überführen, als die irdenen, und dadurch außer der kürzeren Zeit, welche die Zubereitung der Speisen erfordert, auch noch eine Ersparung an Brennmaterial erzielen. Wenn dessenungeachtet die irdenen Töpfe noch in viel häufigerem Gebrauche sind, so rührt dies nur von ihrem bedeutend billigeren Ankaufspreis her. Solcher Anwendungen ließe sich noch eine zahlreiche Menge anführen, die aber größtentheils allgemein bekannt sind, und auch allgemeine Verbreitung gefunden haben. Daß der Schnee ein so schlechter Wärmeleiter ist, ist in der Natur von großer Wichtigkeit, denn dadurch wird, wenn im Winter Schnee die Felder bedeckt, die junge Saat vor dem Eindringen des Winterfrostes geschützt. Auf der ausgezeichneten Wärmeleitungsfähigkeit der Metalle beruht auch Davy's Sicherheitslampe. Dieselbe ist im Jahre 1816 von Humphry Davy erfunden, und zunächst dazu bestimmt, in denjenigen Kohlenbergwerken von den Arbeitern statt der gewöhnlichen Grubenlichter gebraucht zu werden, in welchen es s. g. schlagende Wetter gibt. In Steinkohlenminen strömen häufig aus Rissen Gase hervor, welche aus Wasserstoffgas, mit Kohlenstoff und zuweilen mit etwas Schwefel verbunden, bestehen. Durch die Vermischung derselben mit atmosphärischer Luft bildet das Sauerstoffgas der letzteren mit ihnen eine Art Knallgas, das sich an den Flammen der Grubenlichter entzündet, und mit heftiger Explosion verbrennt, wodurch schon viele Arbeiter um das Leben gekommen sind. Der wesentlichste Theil der Sicherheitslampe ist ein zu einem hohlen Cylinder umgebogenes Drathgeflecht, welches die Flamme der Lampe umgibt. Davy hat nämlich durch Versuche gefunden, daß die Flamme verbrennender Gase durch Geflechte von Draht nicht dringen kann, weil sie durch diese wegen ihrer großen Wärmeleitungsfähigkeit zu sehr abgekühlt wird, und da glühende Drähte verbrennliche Gase nicht entzünden, so kann eine mit einem Drathgeflechte umgebene Flamme in einer Umgebung explodirender Gasarten brennen, ohne diese zu entzünden, selbst wenn das sie umgebende Drathgeflecht glühend wird. Die Weite der Maschen des Drathgeflechtes darf jedoch nicht mehr als 0,05 engl. Zoll betragen, wenn die Sicherung vollständig sein soll.

Aber nicht nur zwischen den Theilen desselben Körpers findet eine Ausgleichung der Temperatur statt, sondern es theilt, wie aus 3 hervorgeht, auch jedesmal, wenn zwei oder mehrere Körper in Berührung stehen, der wärmere dem kälteren so lange Wärme mit, bis alle eine gleiche Temperatur haben. Man sagt von solchen in Berührung stehenden, gleich warmen Körpern, sie seien in dem Zustande des Gleichgewichts der Wärme.

Digitized by Google

Doch ist dieser Zustand nie lange andauernd, ja man könnte sagen, nie in aller Strenge, sondern nur annähernd vorhanden.

Das Steigen des Queckſilbers in 4 ist offenbar nur eine Folge davon, daß sich die Temperatur zwischen unserer Hand, dem Glase und dem Queckſilber des Thermometers ausgleicht, und wir lernen deßhalb aus diesem Versuche, daß die Mittheilung der Wärme desto schneller vor sich geht, je größer der Unterschied der Temperatur in den sich berührenden Körpern ist.

§. 332. **Fortsetzung; Wärmeleitung durch kryſtalliſirte Körper.** 1) Schneidet man aus einem Kryſtall des regulären Systems eine ebene Platte, überzieht sie gleichförmig mit einer Mischung von Olivenöl und Wachs, und berührt sie, nachdem der Ueberzug erkaltet ist, mit der Spitze eines erhitzten Drahtes, so schmilzt das Wachs um den erhitzten Draht herum, und bildet einen kreisförmigen Wall. 2) Schneidet man eine Platte aus einem Kryſtall des quadratiſchen oder heragonalen Systems und zwar so, daß die Ebene der Platte senkrecht zur kryſtallographiſchen Hauptare ist, so erhält man bei gleichem Verfahren ebenfalls einen kreisförmigen Wall; ist aber die Ebene der Platte parallel der kryſtallographiſchen Hauptare, so erhält man einen elliptiſchen Wall. 3) Bei Platten aus Kryſtallen aus einem der drei letzten Kryſtallſyſteme erhält man stets nur elliptiſche Wälle.

Es sind dies Versuche, welche vor einigen Jahren erst von N. de Senarmont veröffentlicht wurden. Sie beweisen im Allgemeinen, daß die Wärmeleitungsfähigkeit in Kryſtallen nicht nach allen Richtungen gleich groß ist, da ja sonst unter allen Umständen das geſchmolzene Wachs nur Kreise bilden könnte, deren Mittelpunkte die Spitze des Drahtes sein müßte. Dieses Reſultat hat Nichts Auffallendes, da ja die Kryſtalle auch in vielen anderen Beziehungen nach verſchiedenen Richtungen eine Verſchiedenheit zeigen, und nachdem Mitſcherlich bereits gezeigt hatte, daß die Wärme auch eine verſchiedene Ausdehnung nach verſchiedenen Richtungen in denſelben bewirke (§. 303). Derjenigen Fläche, in welcher alle diejenigen Punkte liegen, bis zu welchen von einem Punkte aus in einem Körper die Wärme in gleicher Zeit sich verbreitet, gab Senarmont den Namen iſotherme Fläche (ἴσος, η, ον gleich, θέρμη Wärme). Durch die mitgetheilten Verſuche gelangte er zu den folgenden Ergebniſſen, die zeigen, daß die verſchiedenen Kryſtallſyſteme thermiſche Eigenſchaften beſitzen, welche mit den optiſchen Eigenſchaften derſelben eine große Aehnlichkeit verrathen. Aus 1 folgt, daß in den Kryſtallen des regulären Systems die iſothermen Flächen mit der Wärmequelle concentriſche Kugeln ſind, daß alſo die Leitungsfähigkeit nach allen Seiten gleich iſt. Aus den in 2 angeführten Verſuchen muß gefolgert werden, daß bei den Kryſtallen des quadratiſchen und heragonalen Syſtems die iſothermen Flächen Umdrehungsellipſoïde um die kryſtallographiſche Hauptare ſind, daß alſo die Wärmeleitungsfähigkeit nach der Richtung der kryſtallographiſchen Hauptare eine andere iſt, als in der Richtung der Nebenaren. Dieſe Ellipſoïde waren in Beziehung auf die Umdrehungsare bald verlängerte, bald abgeplattete, doch in den meiſten Fällen verlängerte. Die Vermuthung jedoch, daß die Beſtimmung, ob das Ellipſoïd ein verlängertes, oder ein abgeplattetes ſei, davon abhänge, ob der Kryſtall optiſch poſitiv oder negativ ſei, wurde

Digitized by Google

durch die Versuche nicht bestätigt, indem z. B. sowohl bei dem Quarz (einem positiven Krystall), als auch bei dem Kalkspath (einem negativen Krystall) das thermische Ellipsoïd ein verlängertes ist. Aus 3 endlich ergab sich, daß bei den Krystallen der drei letzten Systeme die isothermen Flächen 3axige Ellipsoïde seien. Bei näherer Untersuchung fand sich, daß bei den Krystallen des rhombischen Systems die drei ungleichen Axen des thermischen Ellipsoïds mit der Richtung der drei krystallographischen Axen zusammenfallen, daß demnach bei diesen Krystallen die Leitungsfähigkeit für die Wärme drei Werthe, einen größten, mittleren und kleinsten, in rechtwinkligen, stets den krystallographischen Axen parallelen Richtungen hat; daß in den Krystallen des monoklinischen Systems die Leitungsfähigkeit ebenfalls drei verschiedene Werthe nach rechtwinkligen Richtungen hat, von welchen die eine immer parallel derjenigen krystallographischen Axe ist, welche auf den beiden andern senkrecht steht, während die beiden andern Richtungen im Voraus nicht näher bestimmt werden können; daß endlich bei den Krystallen des triklinischen Systems die drei ungleichen Axen des thermischen Ellipsoïds Lagen haben, welche bis jetzt kein Gesetz im Voraus anzugeben erlaubt.

Hierher gehört auch die von de la Rive und de Candolle nachgewiesene Thatsache, daß das Leitungsvermögen der verschiedenen Holzarten in der Richtung der Längsfasern größer ist, als in der Querrichtung, da auch die Holzarten nicht zu den überall gleichartigen oder homogenen Körpern gerechnet werden können, wie schon daraus erhellt, daß auch ihre absolute Festigkeit in der Längsrichtung der Fasern größer ist, als in der Querrichtung (§. 16).

§. 333. **Wärmeleitung durch tropfbar flüssige und luftförmige Körper.** 1) Bringt man Wasser oder eine andere Flüssigkeit in einem Gefäße über Feuer, so wird man finden, daß die Temperatur der Flüssigkeit ziemlich rasch steigt. 2) Gießt man auf Wasser in einem Glasgefäße Schwefeläther, und entzündet diesen, so wird man, selbst wenn die Flamme längere Zeit gebrannt hat, im Innern des Wassers kaum eine Erhöhung der Temperatur wahrnehmen können. 3) Füllt man ein cylindrisches Gefäß mit warmem Wasser, und bedeckt es mit Eis, so ist dieses bald geschmolzen. Hat man aber das Eis am Boden des Gefäßes befestigt, und das warme Wasser darüber gegossen, so dauert es eine viel längere Zeit, bis das Eis ganz schmilzt. 4) In einem geheizten Zimmer ist es immer unter der Decke wärmer, als am Fußboden. 5) Setzt man auf einen geheizten Ofen eine auf einer Spitze balancirte Spirale von Kartenpapier, so geräth dieselbe in drehende Bewegung. 6) Ein Zimmer heizt sich besser, wenn es mit Vorthüren und Vorfenstern versehen ist, als ohne dieselben. 7) Winde erwärmen und erkälten den Körper sehr bedeutend, je nachdem die strömende Luft warm oder kalt ist.

Wenn man aus 1 auf den ersten Anschein schließen sollte, daß die Flüssigkeiten ziemlich gute Wärmeleiter seien, so wird man doch, sobald man sich des dabei stattfindenden Vorganges aus §. 310 erinnert, bald einsehen, daß man aus der erfolgenden Erwärmung gar nicht auf die Wärmeleitungsfähigkeit der Flüssigkeit zurückschließen dürfe, da dieselbe ja nur die Folge der entstehenden Strömungen, und nicht davon ist, daß jedes Theilchen Wärme an die benachbarten mittheilt. Soll aber wirklich Leitung

Digitized by Google

stattfinden, so muß die Entstehung solcher Strömungen verhindert werden, was eben nur dadurch möglich wird, daß die Flüssigkeiten von Oben erwärmt werden. In diesem Falle zeigt nun aber der 2te Versuch für Wasser wenigstens, daß es zu den schlechten Wärmeleitern gerechnet werden müsse. Der 3te Versuch gibt dafür noch eine Bestätigung, da, wenn das Eis auf dem Wasser liegt, es nur deßwegen rascher geschmolzen wird, weil es, indem die durch das Eis abgekühlten Wassertheilchen zu Boden sinken, mit immer neuen warmen Wassertheilchen in Berührung kommt; wenn aber das Eis auf dem Boden befestigt ist, so bleibt es immer mit denselben Wassertheilchen in Berührung, und haben diese ihre Wärme an das Eis abgegeben, so dauert es lange, bis sie von den darüber liegenden Wassertheilchen wieder neue Wärme empfangen. Aber auch die anderen tropfbaren Flüssigkeiten haben sich nach den angestellten Versuchen als schlechte Wärmeleiter erwiesen, wenn auch in verschiedenem Grade. Am Besten leitet noch das Queckſilber, was aber um so weniger wundern darf, da es zu den Metallen gehört.

Wenn wir finden, daß die Luft in geheizten Zimmern oben wärmer ist, als andere der Wärmequelle näher gelegene Lufttheilchen, so erklärt sich das vollständig ebenfalls durch die Annahme von Strömungen, ganz ähnlich denen in den tropfbaren Flüssigkeiten. Sie müssen sich auch in der Luft und den luftförmigen Körpern noch viel leichter bilden, als in den tropfbaren Flüssigkeiten, weil die Theilchen derselben eine noch viel größere Beweglichkeit besitzen. Diese von dem warmen Ofen aufsteigenden Ströme sind es offenbar auch, welche in dem 5ten Versuche die Spirale in Bewegung setzen. Aus ihnen erklärt sich auch die bekannte Thatsache, daß ein hohes Zimmer sich schwerer heizt, als ein niedrigeres von gleichem Raumesinhalt. Da nun die Erwärmung der luftförmigen Körper auch nicht durch Leitung, sondern durch Strömungen geschieht, so läßt sich die Wärmeleitungsfähigkeit derselben durch directe Versuche nicht bestimmen, und zwar um so weniger, weil in dieselben gebrachte Thermometer Wärme nicht nur von den sie umgebenden Theilchen, sondern auch, wie aus den folgenden Paragraphen erhellen wird, von einer entfernteren Wärmequelle durch Strahlung aufnehmen. Es gibt jedoch andere Erfahrungen, welche uns zu dem Schlusse berechtigen, daß auch die luftförmigen Körper zu den schlechten Wärmeleitern zu zählen seien. Eine solche ist die unter 6 angeführte. Wenn die Erfahrung in 7 dagegen zu sprechen und der Luft doch wieder ein besseres Leitungsvermögen zuzuschreiben scheint, so muß man nur bedenken, daß, sobald wie beim Winde die Luft in Bewegung ist, derselbe Körper, auf welchen die Luft erwärmend oder erkältend einwirkt, immer mit neuen Luftportionen in Berührung kommt. Werden also die luftförmigen Körper schlechte Wärmeleiter genannt, so gilt diese Behauptung nur unter der Bedingung, daß sie sich in dem Zustande der Ruhe befinden.

Auf der Erwärmung der Luft durch Strömungen beruht auch die s. g. Luftheizung. Man stellt den Ofen in ein abgesondertes, kleines, geschlossenes Gemach, das die Heizkammer genannt wird. Die in der Heizkammer stark erwärmte Luft wird dann in die zu heizenden Räume durch Röhren, die 4 bis 5 Fuß über dem Fußboden in diesen Räumen münden, geleitet, während die kalte Luft durch ähnliche Canäle, welche sich in der Nähe des Fußbodens befinden, nach der Heizkammer zurückgeführt

Digitized by Google

wird. Man wendet die Luftheizung hauptsächlich bei großen Räumen, wie Kirchen, Theatern, an, bei welchen keine gleichmäßige Temperatur durch die gewöhnliche Ofenheizung zu erzielen sein würde. Ist nur ein, und zwar nicht zu großer Raum zu heizen, so kann dies auf eine einfachere Weise dadurch geschehen, daß man den Ofen mit einem etwa 6 Zoll von demselben abstehenden Schirme umgibt. Wenn die Luft in dem Zwischenraume erwärmt ist, so steigt sie in die Höhe, und die kältere folgt von Unten nach.

§. 334. **Gesetze der Wärmeleitung.** Man nehme eine 4seitige Metallstange, in welcher in gleichen Entfernungen von einander Löcher angebracht sind. Die Löcher seien mit Quecksilber angefüllt, und in dieses seien die Kugeln von genau übereinstimmenden Thermometern eingesenkt. Wird nun das eine Ende des horizontal liegenden Metallstabes durch eine Weingeistlampe erwärmt, so zeigen die Thermometer eine um so höhere Temperatur an, je näher sie der Lampe sind, und hat der Versuch hinlänglich lang (etwa 2 bis 3 Stunden) gedauert, so kommt eine Zeit, von welcher an die Thermometer alle nicht mehr steigen.

Daß in diesem zuerst von Despretz angegebenen Versuche die Thermometer eine desto niedrigere Temperatur angeben, je weiter nach dem nicht erwärmten Ende zu sie angebracht sind, rührt daher, daß die Wärme, die einem Querschnitte des Stabes von dem unmittelbar vorhergehenden mitgetheilt wird, nicht ganz an den nächsten Querschnitt übergeht, sondern auch theilweise an die Umgebung abgegeben wird. Jeder Querschnitt empfängt demnach weniger Wärme, als der vorhergehende, wodurch sich die Abnahme der Temperatur nach dem nicht erwärmten Ende zu hinlänglich erklärt. Wenn aber nach längerer Zeit die Thermometer nicht mehr steigen, so ist dies nur dadurch möglich, daß jedes Theilchen von den wärmeren ebenso viel Wärme bekommt, als es an die kälteren und die Umgebung abgibt. Indem Despretz, wenn dieser Zeitpunkt eingetreten war, den Stand der verschiedenen Thermometer bemerkte, und den Ueberschuß jedes einzelnen über die äußere Temperatur bestimmte, kam er zu dem Gesetze, daß die Temperatur von der erhitzten Stelle an in einer geometrischen Reihe abnimmt, wenn die Entfernungen in einer arithmetischen Reihe zunehmen. Als er den Versuch mit Stäben desselben Stoffes, aber ungleicher Dicke wiederholte, wurde er zu dem weiteren Gesetze geführt, daß die Entfernungen von der Wärmequelle, bei welchen die Thermometer eine gleiche Temperatur erhalten, den Quadratwurzeln der Durchmesser proportional sind. Auf theoretischem Wege kam er auch noch zu einem 3ten Gesetz, das wenigstens annähernd der Erfahrung entspricht, nämlich daß die Leitungsfähigkeiten zweier verschiedenen Körper von denselben Dimensionen sich wie die Quadrate der Entfernungen von der Wärmequelle verhalten, an welchen die Temperaturüberschüsse über die äußere Temperatur gleich groß sind.

B. Von der Fortpflanzung der Wärme durch Strahlung.

§. 335. **Hypothesen über das Wesen der Wärme.** Ueber das Wesen der Wärme haben sich, ganz ähnlich wie bei dem Lichte, zwei verschiedene

Digitized by Google

Anſichten Geltung zu verſchaffen geſucht. Nach der einen wird auch zur Erklärung der Erſcheinungen der Wärme ein eigenes, äußerſt feines und äußerſt elaſtiſches, unwägbares Fluidum, welches man den Wärmeſtoff nennt, angenommen. Der Wärmeſtoff durchdringt alle Körper, und verbreitet ſich in ihnen mit großer Beweglichkeit. Die Theile deſſelben ſtoßen ſich gegenſeitig ab, und können durch die Oberfläche der Körper entweichen. Dieſe Theorie entſpricht alſo der Emanationstheorie bei dem Lichte. Grade aber wie dieſe verlaſſen werden mußte, als die Erſcheinungen der Beugung, der Polariſation und der doppelten Brechung bekannt wurden, grade ſo hat ſich auch dieſe Annahme eines eigenen Wärmeſtoffes als unhaltbar erwieſen, als die in den folgenden Paragraphen mitgetheilten Reſultate über die ſtrahlende Wärme aufgefunden wurden. Dieſe zeigen nämlich eine ſo große und mannigfache Aehnlichkeit mit einer großen Anzahl der Erſcheinungen des Lichtes, und ſind denſelben ſo nahe verwandt, daß man unwillkürlich dahin gedrängt wurde, auch zur Erklärung der Wärmephänomene die Aufſtellung einer Vibrationstheorie zu verſuchen. Auch die Wärme ſoll, wie das Licht, durch die Vibrationen des Aethers erzeugt werden, und der Unterſchied zwiſchen Wärme und Licht ſoll nur darin beſtehen, daß die Schwingungen des Aethers, welche die Wärme erzeugen, langſamer erfolgen, und alſo auch längere Wellen bilden. Doch iſt man hier noch lange nicht ſo glücklich geweſen, wie in der Lehre von dem Lichte, daß man zeigen könnte, wie alle Erſcheinungen der Wärme nach dieſer Theorie ſich genügend erklären ließen.

§. 336. **Gradlinige Fortpflanzung der ſtrahlenden Wärme.** 1) Es werde eine Wärmequelle in einiger Entfernung von einem Differentialthermometer aufgeſtellt, und ein Schirm, in welchem ſich ein kleines, verdecktes Loch befindet, ſo zwiſchen beide gebracht, daß ſich die Wärmequelle, das Loch in dem Schirme und die eine Kugel des Differentialthermometers in derſelben graden Linie befinden, ſo wird man finden, daß in dem Augenblicke, in welchem das Loch geöffnet wird, die Flüſſigkeit des Differentialthermometers in dem mit der Kugel communicirenden Theile der Röhre fällt, daß aber die Flüſſigkeit ebenſo augenblicklich wieder ſteigt, ſobald das Loch verdeckt wird. 2) Vor eine Wärmequelle werde in einiger Entfernung ein Stück Metall gehalten. Bringt man dann auf der anderen Seite des Metallſtückes an verſchiedene Stellen einer Fläche die Kugel eines empfindlichen Thermometers, ſo wird man bald ein Steigen des Thermometers beobachten, bald nicht. 3) Die Temperatur während eines Tages pflegt in der Regel vom Morgen an bis zum Mittag zu-, und von da bis zum Abend wieder abzunehmen. 4) Vor einer conſtanten Wärmequelle, deren Temperatur ziemlich hoch iſt, ſtelle man in immer gleichen Entfernungen von einander empfindliche Thermometer auf, und warte, bis die Thermometer aufhören zu ſteigen. Vergleicht man dann die Temperaturzunahme der einzelnen Thermometer, ſo wird man finden, daß diejenige des 2ten Thermometers 4mal, die des 3ten 9mal u. ſ. w. kleiner iſt, als die Temperaturzunahme des der Wärmequelle nächſten Thermometers.

Aus dem erſten Verſuche ergibt ſich, daß auch die Wärmeſtrahlen, grade ſo wie die Lichtſtrahlen, ſich nur in grader Linie fortpflanzen, ſo lange wenigſtens ihre Verbreitung in demſelben Mittel ſtattfindet. Zugleich geht aber auch aus dem Verſuche noch hervor, daß

Digitized by Google

die Bewegung der Wärmestrahlen mit großer Geschwindigkeit erfolgt, da gar kein Zeitunterschied zwischen dem Oeffnen des Loches und dem Sinken der Flüssigkeit in dem Differentialthermometer beobachtet wird. Doch glaubte Wrede aus Versuchen, die er angestellt hatte, deren nähere Erörterung aber nicht hierher gehört, schließen zu dürfen, daß diese Geschwindigkeit ungefähr $\frac{2}{3}$ von derjenigen des Lichtes sei.

Wird in dem zweiten Versuche derjenige Raum der Fläche näher zu bestimmen versucht, an welchem kein Steigen des Thermometers stattfindet, so zeigt sich, daß er durch die Strahlen begrenzt wird, welche an dem äußersten Rande des Metallstücks vorbeifahren. Es gibt also auch gewissermaßen einen Schattenraum für strahlende Wärme, ebenso wie für das Licht. Es kann dies auch gar nicht auffallen, da schon bei dem Lichte gezeigt wurde, daß er eine nothwendige Folge der geradlinigen Verbreitung sei.

Wenn wir die Sonnenstrahlen Morgens und Abends eine kleinere wärmende Wirkung hervorbringen sehen, als Mittags, so läßt sich für diese Erscheinung kein anderer Grund auffinden, als daß die Sonnenstrahlen Morgens und Abends viel schräger auf die Erdoberfläche auffallen, als zur Mittagszeit. Es ist also die von Wärmestrahlen erzeugte Erwärmung abhängig von der Lage gegen die Wärmequelle, und ist desto größer, je senkrechter die Wärmestrahlen auffallen. Bei dem Lichte hatten wir ein ganz ähnliches Resultat erhalten (§. 174). Auch geht aus dem dort Mitgetheilten hervor, daß diese Abhängigkeit der Stärke der Erwärmung von der Lage gegen die Wärmequelle ebenfalls wieder eine nothwendige Folge von der geradlinigen Verbreitung ist. Ebenso verhält es sich aber auch mit dem Resultate, das sich aus dem vierten Versuche ziehen läßt. Wir lernen nämlich aus demselben, daß die durch Wärmestrahlen bewirkte Erwärmung in demselben Verhältnisse abnimmt, wie die Quadrate der Entfernungen zunehmen, und können zur Erläuterung dieses Gesetzes nur auf das hinweisen, was §. 173 gesagt ist.

§. 337. **Wärmeausstrahlungsvermögen der Körper.** 1) Stellt man nach einander verschiedene Körper, die bis zu einem gleichen Grade erwärmt sind, in gleicher Entfernung der einen Seite der Löthstellen einer Thermosäule (§. 117) gegenüber, deren Poldrähte mit einem Multiplicator verbunden sind, so wird man finden, daß die Multiplicatornadel durch die verschiedenen Körper eine verschiedene Ablenkung erleidet. 2) Stellt man die Versuche mit demselben Körper an, nur daß er bei den einzelnen Versuchen eine verschieden hohe Temperatur hat, so wird die Nadel desto mehr abgelenkt, je höher die Temperatur des Körpers ist. 3) Man nehme einen hohlen Würfel von Messingblech, dessen eine Seitenfläche polirt, die zweite geritzt, die dritte mit Tusch, die vierte mit Kienruß überzogen ist, fülle denselben mit heißem Wasser, und erhalte seine Temperatur durch eine untergesetzte Weingeistlampe constant. Wird nun dieser Würfel in einiger Entfernung von der Thermosäule aufgestellt, doch so, daß die Thermosäule bald der einen, bald der andern Seitenfläche zugekehrt ist, so wird man finden, daß die Nadel wieder verschiedene Ablenkungen zeigt, je nachdem die Thermosäule der einen oder anderen Seitenfläche zugekehrt ist. Die Ablenkung ist am kleinsten, wenn die polirte Fläche der Thermosäule die

Digitized by Google

Strahlen zusendet, und wächst immer mehr, wenn die Seitenflächen in derjenigen Aufeinanderfolge, in welcher sie oben aufgeführt sind, der Thermosäule zugewandt werden.

Wir wissen schon aus §. 117, daß die Ablenkung der Magnetnadel Folge eines in der Thermosäule erregten electrischen Stromes ist, und daß dieser Strom entsteht durch die Temperaturdifferenz der beiden Seiten der Löthstellen. Eine größere Ablenkung zeigt einen kräftigeren Strom an, und die Intensität des Stromes wird um desto größer, je größer die Temperaturdifferenz der beiden Seiten ist, je mehr Wärmestrahlen also in einer bestimmten Zeit auf die eine Seite fallen. Wir lernen daher aus dem ersten Versuche, daß bei verschiedenen Körpern das Ausstrahlungs- oder Emissionsvermögen für die Wärme nicht gleich groß ist. Von den bis jetzt untersuchten Körpern hat man es bei den Metallen am kleinsten, und beim Kienruß am größten gefunden. Im Allgemeinen strahlen weniger dichte Körper mehr Wärmestrahlen aus, als dichtere. So zeigt sich z. B. das Emissionsvermögen einer gegossenen Metallplatte größer, als dasjenige einer gehämmerten oder gewalzten von demselben Metall. Aus dem zweiten Versuch ersehen wir aber, daß nicht einmal bei demselben Körper das Emissionsvermögen unter allen Umständen gleich bleibt, sondern von der Temperatur desselben abhängig ist, und mit derselben wächst.

Wenn endlich der Versuch mit dem Leslie'schen Würfel (so genannt, weil Leslie ihn zuerst angegeben hat) gewöhnlich angeführt wird, um den Einfluß der verschiedenen Beschaffenheit der Oberfläche auf das Strahlungsvermögen zu zeigen, so muß zunächst bemerkt werden, daß bei der berußten und der mit Tusch überzogenen Seitenfläche nicht mehr Messing der ausstrahlende Körper ist, sondern der Kienruß und der Tusch. Denn bei beiden Flächen wird die Wärme offenbar erst von dem Wasser dem Messing mitgetheilt, pflanzt sich durch dasselbe durch Leitung fort, und wird dann an den Kienruß und den Tusch von demselben abgegeben. Bei der polirten und geritzten Seitenfläche dagegen ist es anders. Bei beiden sendet derselbe Körper, das Messing, die Strahlen aus, auch ist die Temperatur beider Flächen gleich groß, und doch strahlt die geritzte mehr Strahlen aus, als die polirte. Wir können uns diese Erscheinung auf folgende Weise erklären. Durch die Bearbeitung der Messingplatten, durch das Walzen, Hämmern, Poliren, findet hauptsächlich eine Einwirkung auf die nach Außen gelegenen Theile des Messings statt, diese werden durch die genannten Operationen näher zusammengebracht, also dichter gemacht; wird nun die Oberfläche geritzt, so werden dadurch weniger dichte Stellen blosgelegt, es ist aber bereits bemerkt, daß dichtere Körper ein geringeres Strahlungsvermögen haben, als weniger dichte.

§. 338. **Wärmeabsorptionsvermögen der Körper.** 1) Alle Körper können, wenn sie den Sonnenstrahlen ausgesetzt werden, eine Temperatur annehmen, welche höher ist, als die Temperatur der Luft. 2) Man setze 2 übereinstimmende Thermometer, von welchen aber die Kugel des einen geschwärzt ist, gleichzeitig den Sonnenstrahlen aus, so wird dasjenige mit der geschwärzten Kugel weit höher steigen, als das andere.

Bei den bisherigen Versuchen sahen wir diejenigen Körper, auf welche die Wärmestrahlen auffielen, sich erwärmen. Es ist dies aber nur dann möglich, wenn man annimmt, daß sie die Strahlen, welche sie treffen, mehr

Digitized by Google

oder weniger in sich aufzunehmen, d. h. zu absorbiren im Stande sind. Man schreibt ihnen daher ein Absorptionsvermögen für die Wärme zu. Da nun aus 1 ersichtlich ist, daß alle Körper, den directen Sonnenstrahlen ausgesetzt, eine höhere Temperatur annehmen können, als die gerade stattfindende Lufttemperatur, so muß ein solches Absorptionsvermögen auch allen Körpern zugeschrieben werden. Zugleich zeigt aber auch der zweite Versuch, daß dieses Vermögen unter sonst gleichen Umständen doch nicht bei allen Körpern gleich ist, denn das höhere Steigen des Thermometers mit geschwärzter Kugel kann doch wohl nur davon herrühren, daß, während auf beide Thermometer in gleicher Zeit gleich viele Wärmestrahlen auffallen, doch die geschwärzte Kugel eine größere Menge derselben absorbirt.

Da nun die Körper sich nicht nur durch die geleitete Wärme erwärmen, sondern auch durch die strahlende, so muß der strahlenden Wärme zur Erzielung des in §. 331 erwähnten beweglichen Gleichgewichtes der Wärme auch ein Antheil zugeschrieben werden, und zwar wegen ihrer bedeutenden Geschwindigkeit ein verhältnißmäßig größerer Antheil, als der geleiteten Wärme. Ein solches Gleichgewicht wäre aber gar nicht denkbar, wenn es Körper gäbe, welche bloß das Absorptionsvermögen hätten, ohne zugleich auch ein Emissionsvermögen zu besitzen, denn solche Körper würden, statt ihre Temperatur mit derjenigen ihrer Umgebung auszugleichen, offenbar eine immer höhere Temperatur annehmen. Das Emissionsvermögen muß also ebenso allgemein allen Körpern zugeschrieben werden, wie das Absorptionsvermögen. In einem Systeme von Körpern erhält demnach jeder von dem andern Wärmestrahlen, und sendet ihm auch selbst solche zu, und es muß von dem Verhältniß der absorbirten und der ausgestrahlten Wärme abhängen, ob die Temperatur eines Körpers steigt, oder ein Erkalten desselben eintritt. Ein Gleichgewicht der Temperatur ist natürlich nur dann möglich, wenn jeder von den übrigen so viel Wärme empfängt, als er in derselben Zeit an dieselben abgibt. Ein solches Gleichgewicht wäre demnach gar nicht denkbar, wenn wir nicht annehmen, daß diejenigen Körper, welche ein größeres Emissionsvermögen besitzen, auch ein größeres Absorptionsvermögen haben. Melloni fand dies auch durch folgende Versuche bestätigt. Er nahm kreisrunde Scheiben von dünnem Metallblech, überzog die eine Seite derselben bei allen mit Kienruß, die andere dagegen bei den einzelnen immer mit einer solchen Substanz, deren Emissionsvermögen er bereits kannte, und deren Absorptionsvermögen er prüfen wollte. Diese Scheiben stellte er nach einander zwischen einer Wärmequelle und der Thermosäule auf, doch so, daß bei jedem Versuche die berußte Seite der Thermosäule und die andere der Wärmequelle zugewandt war. Die Wärme nun, welche diese letztere Seite von den von der Wärmequelle ausgehenden Strahlen absorbirte, wurde von der berußten Seite nach der Thermosäule ausgestrahlt, und also durch die Ablenkung der Multiplicatornadel gemessen.

Im vorigen Paragraphen wurde gezeigt, daß das Emissionsvermögen bei demselben Körper mit der Temperatur wachse. Es fragt sich nun, ob dies auch bei dem Absorptionsvermögen der Fall sei. Wenn man nun annähme, daß dies wirklich stattfände, und daß, wenn der Körper einen größeren Verlust durch Strahlung erleidet, er auch wieder einen verhältnißmäßig größeren Ersatz durch Absorption erhielte, so wäre offenbar eine Ausgleichung der Temperatur zwischen den verschiedenen Körpern nicht

Digitized by Google

möglich, sondern die wärmeren würden auch die wärmeren bleiben und umgekehrt. Wir müssen demnach annehmen, daß bei demselben Körper das Absorptionsvermögen mit dem Emissionsvermögen im umgekehrten Verhältnisse stehe, und daß Alles, was ersteres erhöht, im gleichen Grade letzteres vermindert.

§. 339. **Reflexion der Wärmestrahlen.** 1) Richtet man einen metallenen Hohlspiegel gegen die Sonne, und befestigt in dem Brennpunkte desselben einen leicht entzündlichen Körper, z. B. ein Stückchen Zunder, so entzündet sich derselbe. 2) Stellt man 2 solcher Spiegel in ziemlicher Entfernung von einander so auf, daß ihre Aren zusammenfallen, und bringt in den Brennpunkt des einen einen stark erhitzten Körper, etwa eine glühende eiserne Kugel oder eine glühende Kohle, und in den Brennpunkt des andern die Kugel eines Thermometers oder einen leicht entzündlichen Körper, so sehen wir das Thermometer sehr rasch steigen oder den Körper sich entzünden, während beide Wirkungen in derselben Entfernung von der Wärmequelle ohne die Dazwischenkunft der Hohlspiegel nicht hervorgebracht werden können. 3) Bringt man in den Brennpunkt des einen Hohlspiegels ein Stück Eis und in den des andern die Kugel eines Thermometers, so sinkt das Thermometer. 4) Wird die spiegelnde Fläche des ersten Hohlspiegels berußt, so wird in dem Brennpunkt des andern keine Wirkung mehr beobachtet. 5) Man lasse durch eine Oeffnung in dem Laden eines dunkelen Zimmers Sonnenstrahlen auf eine der Oeffnung gegenüberliegende Wand fallen, und stelle an irgend einer Stelle des Zimmers die Thermosäule so auf, daß die eine Seite der Löthstellen dem erleuchteten Fleck auf der Wand zugekehrt ist, so beobachtet man eine Abweichung der Magnetnadel des Multiplicators. Die Nadel geht aber sogleich wieder zurück, sobald die Oeffnung in dem Laden verschlossen wird.

Die Wirkung in 1 ist offenbar nur dadurch möglich, daß in dem Brennpunkte des Hohlspiegels viele von der Sonne ausgehende Wärmestrahlen zusammentreffen. Da aber diese wegen der großen Entfernung der Sonne als parallel auf den Hohlspiegel auffallend angesehen werden können, so ist ihre Vereinigung in dem Brennpunkte, wie in der Lehre vom Lichte gezeigt wurde (§. 183), nur dann möglich, wenn sie von dem Spiegel unter demselben Winkel zurückgeworfen werden, unter welchem sie auffallen. Der zweite Versuch unterscheidet sich von dem ersten nur dadurch, daß durch den ersten Hohlspiegel die Strahlen erst parallel gemacht werden, ehe sie auf den zweiten auffallen (vergl. §. 159). Gerade von der durch die Vereinigung der Wärmestrahlen erzeugten Hitze haben die Brennpunkte der Hohlspiegel ihre Namen erhalten. Wenn wir in dem dritten Versuche das Thermometer sinken sehen, so darf das nicht allenfalls so angesehen werden, als ob von dem Eise Kälte ausstrahle, sondern die Erscheinung erklärt sich dadurch, daß das Thermometer wegen seiner höheren Temperatur durch seine eigene Ausstrahlung mehr Wärme verliert, als es von dem kalten Körper zurückempfängt. Es ist dieser Versuch also ein schlagender Beweis für die Thatsache des gegenseitigen Wärmeaustausches der Körper und des beweglichen Gleichgewichtes. Aus dem vierten Versuche ergibt sich, daß nicht alle Flächen zur Reflexion der Wärmestrahlen gleich geeignet sind. Was endlich den letzten Versuch betrifft, so lernen wir aus demselben, daß die auf eine Fläche fallenden Wärmestrahlen auch un-

Digitized by Google

regelmäßig reflectirt oder zerstreut, d. h. nach allen Richtungen hin zurückgeworfen werden können, denn daß der an der Thermosäule auftretende electrische Strom nicht die Folge einer Erwärmung der von den Sonnenstrahlen beschienenen Stelle der Wand ist, geht daraus hervor, daß die Nadel beim Verschließen der Oeffnung wieder zurückgeht, da doch dadurch die allenfalls stattgefundene Erwärmung der Stelle der Wand nicht aufgehoben wird.

Wir lernen aus unserem Paragraphen wieder eine auffallende Uebereinstimmung in dem Verhalten der Wärmestrahlen mit demjenigen der Lichtstrahlen, wir sehen, daß sie an einer polirten Fläche sowohl eine regelmäßige, als auch eine unregelmäßige Reflexion oder Zerstreuung erleiden können, und daß sie bei der regelmäßigen Reflexion genau dieselben Gesetze befolgen, wie die Lichtstrahlen.

Untersucht man in den zwei ersten Versuchen die Temperatur der Hohlspiegel, nachdem sie den Strahlen der Wärmequelle entzogen sind, so wird man kaum eine Temperaturerhöhung derselben wahrnehmen können. Anders dagegen ist es in dem vierten Versuche. Denn wenn man die Temperatur des berußten Spiegels untersucht, so findet man allerdings, daß sich derselbe erwärmt hat. Wir haben auch schon in dem vorhergehenden Paragraphen gesehen, daß polirte Metalle nur ein sehr geringes, Ruß dagegen ein sehr großes Absorptionsvermögen besitzen. Hieraus ergibt sich also, daß eine Fläche desto besser und vollständiger die Wärmestrahlen reflectirt, je weniger sie dieselben absorbirt. Es liegt dies auch in der Natur der Sache, denn offenbar muß ja die Summe der reflectirten und absorbirten Strahlen stets gleich sein der Gesammtheit der auf den Körper auffallenden Strahlen, für den Fall wenigstens, daß der Körper keine Wärmestrahlen durch sich hindurchläßt.

Die Reflexion der Wärmestrahlen wurde zuerst im Jahre 1686 von Mariotte nachgewiesen.

§. 340. **Diathermanität.** 1) Wenn man zwischen eine Wärmequelle und die Thermosäule einen Schirm von Metall aufstellt, so geht die Multiplicatornadel, welche vorher abgewichen war, auf den Nullpunkt der Theilung zurück. Schaltet man aber statt des Metallschirmes eine Platte von Steinsalz ein, so sieht man die Nadel kaum um ein Merkliches zurückgehen. 2) Wendet man einmal als Zwischenkörper eine Glasplatte an, die mit Tusch geschwärzt ist, und das andere Mal eine Glasplatte, die nicht geschwärzt ist, so wird man in dem ersteren Falle kaum eine Einwirkung auf die Magnetnadel beobachten, im letzteren Fall aber wird sie ziemlich bedeutend abgelenkt werden. 3) Gesetzt die Wärmequelle sei in einer solchen Entfernung von der Thermosäule aufgestellt worden, daß ohne Anwendung eines Zwischenkörpers die Nadel um 30° abgelenkt wird. Wird dann zwischen beiden eine 3 bis 4 Millimeter dicke Steinsalzplatte aufgestellt, so geht die Nadel um höchstens 2 bis 3 Grade zurück; nimmt man aber statt der Steinsalzplatte eine eben so dicke Quarzplatte, so geht die Nadel um etwa 15° zurück. 4) Nimmt man in dem eben vorausgesetzten Falle eine wasserhelle Alaunplatte, so geht die Nadel fast ganz zurück, so daß sie höchstens nur noch 3 bis 4 Grade abweicht; nimmt man aber eine selbst noch dickere Platte von dunkelgefärbtem Rauchtopas, so beträgt die Ablenkung doch noch 14 bis 15 Grade.

Digitized by Google

Aus dem ersten Versuche ergibt sich, daß manche Körper, wie das Steinsalz, die auf sie fallenden Wärmestrahlen durch sich hindurchlassen, während andere Körper, wie die Metalle, ihnen den Durchgang nicht gestatten. Die Erklärung, daß das Steinsalz nur dadurch in der Thermosäule einen electrischen Strom hervorrufe, daß es sich durch die auf es fallenden Strahlen erwärme, und nun selbst wieder wegen seiner höheren Temperatur nach der Thermosäule hin Strahlen aussende, daß dagegen bei den Metallen, wie schon erwähnt worden sei, keine solche Erwärmung stattfinde, und von ihnen deßwegen auch keine Strahlen ausgesendet werden könnten, wird durch den zweiten Versuch schlagend widerlegt. Wir wissen ja, daß die mit Tusch überzogenen Oberflächen sich durch die strahlende Wärme sehr stark erwärmen. Wäre demnach die angeführte Erklärung richtig, so müßten offenbar, wenn die mit Tusch überzogene Glasplatte den Zwischenkörper bildete, mehr Strahlen auf die Thermosäule fallen, die Temperaturdifferenz zwischen den Löthstellen größer, und der dadurch hervorgerufene electrische Strom stärker werden, die Multiplicatornadel also eine bedeutendere Ablenkung erfahren. Der Versuch ergibt aber grade das entgegengesetzte Resultat, und zwingt uns demnach, die zuerst gegebene Erklärung festzuhalten, und anzunehmen, daß einige Körper die Wärmestrahlen durch sich hindurchlassen, andere nicht, grade wie wir ja auch bei dem Lichte die Körper eingetheilt haben in durchsichtige oder solche, welche den Lichtstrahlen den Durchgang gestatten, und undurchsichtige oder solche, welche dies nicht thun. Nach Melloni, durch dessen herrliche Untersuchungen überhaupt erst eine nähere Kenntniß über die strahlende Wärme gewonnen wurde, theilt man demnach die Körper ein in diathermane (διαθερμαίνειν durchwärmen, durchwärmige) und athermane (ἀ in Zusammensetzungen negirt und θερμαίνειν erwärmen, undurchwärmige), je nachdem sie von der Wärme durchstrahlt werden oder nicht, und nennt die Eigenschaft der Körper, Wärme überhaupt durchzulassen, Diathermanität. Aus dem dritten Versuche geht nun hervor, daß es von der Diathermanität verschiedene Grade gibt, wie dies ebenso auch bei der Durchsichtigkeit der Fall ist. Das Steinsalz muß in einem höheren Grade diatherman sein, als der Quarz, es muß wegen der stärkeren Ablenkung der Magnetnadel einen größeren Theil der auffallenden Strahlen hindurchlassen, als der Quarz.

Bei der großen Verwandtschaft, welche wir bisher schon zwischen Licht- und Wärmestrahlen kennen gelernt haben, und in den folgenden Paragraphen noch kennen lernen werden, sollte man vermuthen, daß die Diathermanität und Durchsichtigkeit nur immer denselben Körpern zukommen werde, daß die durchsichtigsten zugleich auch die diathermansten seien. Der letzte Versuch zeigt aber, daß zwischen beiden Eigenschaften durchaus keine solche nähere Beziehung besteht; der sehr durchsichtige Alaun ist in einem bedeutend niedrigeren Grade diatherman, als der viel dunklere Rauchtopas, ja man kennt sogar undurchsichtige Körper, wie das schwarze Glas und den schwarzen Glimmer, welche aber doch ziemlich viele Wärmestrahlen durchlassen.

Melloni untersuchte auch den Einfluß der Oberfläche auf die Diathermanität, indem er acht aus einer und derselben Scheibe geschnittene, gleich dicke Schirme von Spiegelglas anwandte, deren Oberflächen einen Uebergang von der größten Rauhheit bis zur feinsten Politur bildeten, und

Digitized by Google

es ergab sich, daß auf gleiche Weise wie das Licht auch die Wärme am leichtesten durch glatte Oberflächen dringt. Ferner untersuchte er den Einfluß der Dicke der Körper auf die Diathermanität, und erhielt das Resultat, daß die Wärmeverluste mit der Dicke zunehmen, jedoch ohne ein bestimmtes Gesetz. Bei Steinsalz war diese Zunahme fast Null, bei Rauchtopas und Kalkspath sehr unbedeutend, bei andern weniger diathermanen Körpern aber bedeutender.

§. 341. **Diathermansie oder Thermochrose.** 1) Man verschaffe sich verschiedene Wärmequellen von constanter Temperatur, z. B. eine Locatelli'sche Lampe, eine rothglühende Platinspirale (Davy's Glühlämpchen), einen Kupferhut, welcher über einer Weingeistlampe bis zu einer Temperatur über 400° erhitzt ist, und ein geschwärztes, mit siedendem Wasser gefülltes Gefäß von dünnem Kupferblech, ermittle dann die Entfernungen von der Thermosäule, in welcher jede einzelne eine gleich große Ablenkung der Multiplicatornadel bewirkt, und wenn diese gefunden sind, dann stelle man eine und dieselbe Platte eines diathermanen Körpers nach einander zwischen den verschiedenen Wärmequellen und der Thermosäule auf. Man wird in der Regel finden, daß die Ablenkungen der Magnetnadel verschieden ausfallen, je nachdem die eine oder die andere Wärmequelle in Anwendung kommt. Von allen von Melloni untersuchten Körpern war nur bei dem Steinsalz in allen vier Fällen die Ablenkung gleich groß. 2) Wärmestrahlen, welche bereits durch eine Platte eines diathermanen Körpers gegangen sind, erleiden bei dem Durchgange durch eine zweite Platte desselben diathermanen Körpers von gleicher Dicke einen weit geringeren Verlust, als sie bei dem Durchgang durch die erste Platte erlitten haben. 3) Wendet man aber als zweite Platte eine Platte von einem andern diathermanen Körper an, so ist das Resultat in den verschiedenen Fällen sehr verschieden, wie folgende Versuche Melloni's beweisen. Er stellte zwischen die Wärmequelle und die Thermosäule eine Platte Citronensäure so auf, daß die durch die Platte fallenden Strahlen eine Ablenkung der Nadel von 30° bewirkten. Wurde dann eine Platte Alaun so gestellt, daß die durch die Citronensäure gegangenen Strahlen diese gleichfalls durchdringen mußten, ehe sie zur Säule gelangten, so ging die Nadel nur um 3 bis 4 Grade zurück. Statt der Citronensäure wurde dann auch eine Reihe anderer Körper angewandt. Während die Alaunplatte von 100 durch die Citronensäure, Gyps, weinsaures Kalinatron gegangenen Wärmestrahlen beziehungsweise 85,72 und 80 durchließ, ließ sie von 100 durch grünen Turmalin gegangenen nur 7, durch Steinsalz gegangenen 9, durch Borax gegangenen 11 durch.

Ehe Melloni die in 1 beschriebenen Versuche anstellte, hatte er eine vorläufige Versuchsreihe dazu bestimmt, zu erforschen, in wiefern die Dicke der diathermanen Körper auf die Menge der von den verschiedenen Wärmequellen ausgehenden Strahlen einen Einfluß ausübt, und es ergab sich, daß diese Menge bei allen Wärmequellen mit der Dicke der Lamellen abnimmt, aber für jede Wärmequelle in einem verschiedenen Verhältniß, und zwar der Intensität der Wärmequelle umgekehrt proportional. Auch fand Melloni, daß die aus früheren Versuchen entstandene Ansicht, als ob die dunkelen Wärmestrahlen die Körper gar nicht durchdringen könnten, dadurch sich

Digitized by Google

gebildet habe, daß die angewandten Lamellen zu dick waren. Bei seinen Versuchen mit Gyps und Glimmer, welche sich in äußerst dünne Lamellen spalten lassen, fand er, daß die Menge der von allen Wärmequellen durchdringenden Strahlen sich der Gleichheit um so mehr nähere, je dünner die Blättchen werden. Daraus folgt nun, daß die Wärmestrahlen nicht von der Oberfläche zurückgeworfen werden können, sondern wirklich in das Innere der Körper eindringen, und hier erst verschwinden, oder, wie Melloni sich ausdrückt, daß die Wärmestrahlen von verschiedener Abkunft mehr oder weniger schnell im Innern einer und derselben Masse erlöschen, die Theilchen der Körper also auf die strahlende Wärme eine wirkliche Absorptionskraft ausüben, und zwar eine desto stärkere, je niedriger die Temperatur der Wärmequelle ist. Als Resultat der Versuche in 1 fand er sodann, daß mit Ausnahme des Steinsalzes bei allen Körpern die Größe ihrer Diathermanität von der Wärmequelle abhängt. Bei der Locatelli'schen Lampe war sie am größten, und nahm in derselben Ordnung ab, wie die Wärmequellen oben genannt sind. Für die dierte Wärmequelle waren außer dem Steinsalze von den untersuchten Körpern nur noch drei diatherman, und zwar diejenigen, die auch bei den andern Quellen die größte Diathermanität besaßen, wie Flußspath. Für die Wärme des erhitzten Kupferhutes zeigten sich noch 14 der untersuchten Körper atherman, für die Glühlampe 4, und für die Locatelli'sche Lampe gar keiner. Daraus geht nun hervor, daß es Wärmestrahlen von verschiedener Beschaffenheit geben muß, indem einige von gewissen Körpern mehr, als andere, absorbirt werden. Wie schon bemerkt, ist Steinsalz von allen untersuchten Körpern der einzige, welcher von allen den verschiedenen Wärmestrahlen eine gleiche Menge absorbirt und durchläßt. Melloni vergleicht dieses Verhalten der verschiedenen Wärmestrahlen mit dem Durchlassen der Lichtstrahlen durch verschiedenfarbige Gläser, indem nur die mit den farbigen Medien gleiche Farben besitzenden Lichtstrahlen frei durch diese dringen, die anderen aber absorbirt werden, und es wären demnach die dunkleren Wärmestrahlen den farbigen Lichtstrahlen ähnlich, welche nur durch gewisse Körper dringen, die von der Sonne und einer hell glänzenden Flamme, wie der Locatelli'schen Lampe, aber dem weißen Lichte. Auch darin daß, wie aus 2 ersichtlich, Wärmestrahlen, wenn sie durch eine diathermane Platte gedrungen sind, durch eine zweite von derselben materiellen Beschaffenheit mit geringerem Verluste dringen, zeigt sich die Wärme dem Verhalten des Lichtes analog, denn die weißen Lichtstrahlen verlieren viel beim Durchfallen durch eine farbige Glasplatte, die durch diese gedrungenen farbigen Lichtstrahlen aber verlieren nur wenig, wenn sie eine zweite Glasplatte von gleicher Farbe durchdringen. Was endlich die in 3 aufgeführten Versuche betrifft, so zeigt sich auch hier wieder eine Aehnlichkeit zwischen Wärme- und Lichtstrahlen, denn auch die Lichtstrahlen, welche durch farbige Medien gegangen sind, durchdringen andere gleichfarbige Medien leichter, als anders gefärbte. Melloni belegte daher diese Erscheinung der Wärmestrahlen mit dem Namen Diathermansie (ein Wort, das er ebenfalls von διαθερμαίνειν gebildet hat). Richtiger nennt man es jetzt wohl Thermochrose oder Wärmefärbung (θέρμη Wärme, χρῶσις das Färben).

Digitized by Google

Da die von irdischen leuchtenden Körpern ausgehenden Wärmestrahlen solche Verschiedenheiten gezeigt hatten, so vermuthete Melloni, daß auch im Sonnenlichte eben solche verschiedene Wärmestrahlen gemischt seien. Seine Versuche bestätigten diese Vermuthung. Als er nämlich Sonnenstrahlen durch eine mit grünem Glase bedeckte Oeffnung in ein dunkeles Zimmer auf die geschwärzte Kugel eines Differentialthermometers fallen ließ, sank die Flüssigkeit durch die entbundene Wärme sogleich bedeutend, kehrte nur wenig zurück, als dicht bei der Oeffnung eine klare Glasplatte eingeschoben wurde, aber sehr merklich, als statt ihrer eine Alaunplatte diente. Die rückgängige Bewegung der Flüssigkeit wurde bemerkbarer, als die dünne Glasplatte weggenommen, und statt ihrer eine dickere hingehalten ward. Sobald aber eine Platte Steinsalz an deren Stelle kam, sank die Flüssigkeit augenblicklich zu ihrer vorigen Tiefe.

§. 342. **Brechung der Wärmestrahlen.** 1) Wenn man eine biconvere Glaslinse nach der Sonne richtet, um im Brennpunkte der Linse das Sonnenbildchen entstehen zu sehen, so beobachtet man im Brennpunkte der Linse zugleich eine sehr große Erwärmung. Leicht brennbare Körper, welche sich daselbst befinden, werden entzündet. 2) Stellt man in der graden Linie, welche eine Wärmequelle mit der Thermosäule verbindet, ein Steinsalzprisma mit verticaler brechender Kante auf, so wird man trotz der großen Diathermanität des Steinsalzes doch keine Ablenkung der Multiplicatornadel beobachten. Sucht man aber die Richtung auf, in welcher ungefähr die Lichtstrahlen aus dem Prisma austreten würden, wenn die Wärmequelle eine Lichtquelle wäre, und stellt dann die Thermosäule so, daß ihre Are mit dieser Richtung zusammenfällt, so wird die Nadel abgelenkt. 3) Erzeugt man durch ein Steinsalzprisma das Newton'sche Farbenspectrum der Sonne, und untersucht auf der auffangenden Wand an verschiedenen Stellen die Temperatur, so überzeugt man sich auch von dem Vorhandensein eines Wärmespectrums, das sich von dem Lichtspectrum durch noch größere Ausdehnung unterscheidet, indem es nach beiden Seiten hin über dasselbe hinausreicht.

Die Erhitzung in dem Brennpunkte der Converlinse kann offenbar nur davon herrühren, daß hier eine verhältnißmäßig größere Anzahl von Wärmestrahlen zusammentreffen. Dies ist aber bei der gradlinigen Verbreitung der Wärmestrahlen nur dann möglich, wenn die auf die Linse auffallenden Wärmestrahlen grade so wie die Lichtstrahlen bei ihrem Durchgang durch die Linse zusammengebrochen werden. Noch eigenthümlicher zeigt die Ablenkung der Wärmestrahlen durch Brechung der zweite Versuch. Wir lernen aus demselben aber auch noch außerdem, daß die mittlere Brechbarkeit der Wärmestrahlen, wenigstens bei dem Steinsalz von derjenigen des Lichtes fast gar nicht verschieden ist. Genauere Versuche ergaben für die Wärmestrahlen den Werth 1,51 bis 1,54, und für das Licht 1,54 bis 1,57. Melloni fand auch dadurch, daß er wieder verschiedene Wärmequellen anwandte, daß die mittlere Brechbarkeit der von verschiedenen Quellen ausgehenden Wärme sehr wenig, bei dem Versuche kaum oder gar nicht wahrnehmbar verschieden ist. Aus dem letzten Versuche endlich ergab sich das wichtige Resultat, daß die Sonnenwärme ebensowenig wie das Sonnenlicht einfach oder homogen sei, sondern als aus verschiedenen Bestandtheilen zusammengesetzt betrachtet werden müsse, die

Digitized by Google

sich durch eine verschiedene Brechbarkeit und, wie zu Ende des vorigen Paragraphs gezeigt ist, auch durch eine verschiedene Wärmefarbe von einander unterscheiden. Die Verschiedenheit in der Brechbarkeit ist aber bei der Wärme selbst noch größer, als bei dem Lichte. Der Versuch weiset nämlich solche Strahlen nach, welche theils schwächer gebrochen werden, als die rothen, theils aber auch selbst stärker, als die violetten Lichtstrahlen. Während bei dem Lichte die gelben Strahlen die intensivsten waren, finden wir hier bei näherer Untersuchung, daß die intensivsten Wärmestrahlen noch jenseits des rothen Endes des Lichtspectrums fallen.

§. 343. **Beugung und Interferenz der Wärmestrahlen.** Auch diese beiden Erscheinungen sind in neuester Zeit für die strahlende Wärme ebensogut nachgewiesen worden, wie für das Licht, wie folgende Versuche zeigen, zu deren Verständniß man die entsprechenden Paragraphen in der Lehre von dem Lichte vergleiche. Knoblauch beobachtete die Beugung der Wärmestrahlen, indem er die Sonnenstrahlen durch eine Spaltöffnung gehen ließ, und an einem hinter den Spalt gehaltenen empfindlichen Thermoscope eine seitliche Ausbreitung der Wärme wahrnahm. Den Versuch, den A. Seebeck zum Nachweis der Interferenz der Wärmestrahlen anstellte, beschreibt er selbst so: „Ich leitete das Sonnenlicht durch einen belegten Glasspiegel in die dunkele Kammer, ließ dasselbe durch eine 1½ Zoll breite Spalte gehen, und fing es 10 Fuß hinter derselben mit einem Fernrohr auf, vor dessen Objectiv sich ein sehr feines Stabgitter befand. Mann kann das Licht, nachdem es aus dem Ocular des Fernrohrs getreten ist, auf der Wand auffangen, und so die Gitterspectra objectiv und beliebig vergrößert darstellen. Man sieht dann in der Mitte ein scharfbegrenztes, weißes Feld, zu beiden Seiten desselben einen dunkelen Raum, darauf folgend das erste Spectrum u. s. w. Diese Theile wurden in einem passenden Abstande durch die schwarze Kugel eines Leslie'schen Photometers aufgefangen. Die Kugel hat über einen Zoll Durchmesser, die Scala ist in Pariser Linien getheilt und das ganze Instrument mit einer Glasglocke bedeckt. Ich habe den Stand desselben in folgenden 5 Stellungen beobachtet: 1) in dem mittleren weißen Felde; 2) und 3) in dem dunkelen Raume rechts und links von der Mitte; 4) und 5) wurde die Kugel in das erste Spectrum rechts und links gebracht. Das weiße Feld zeigte in der That eine recht bemerkbare Erwärmung, das erste Spectrum eine ungefähr halb so große, dagegen der dunkele Zwischenraum eine entschieden geringere."

§. 344. **Polarisation der Wärmestrahlen.** 1) Forbes ließ die Strahlen einer gemeinen Lampe ohne Schirm durch 2 Turmalinplatten gehen, und beobachtete die Wirkungen, welche die austretenden Strahlen hervorbrachten, je nachdem die Aren der beiden Turmalinplatten parallel oder gekreuzt waren. Im ersteren Fall war die Wirkung immer bedeutender, als im letzteren. Als er aus den verschiedenen Wirkungen das Verhältniß der durchgelassenen Strahlen berechnete, fand er als Mittel von einer Anzahl von Versuchen, daß von 100 Wärmestrahlen, welche die Turmalinplatten bei parallelen Aren durchließen, bei sich kreuzenden Aren nur 86,4 durchgingen. 2) Er verfertigte sich dann einen Apparat, der dem gewöhnlichen Lichtpolarisationsapparate ganz nachgebildet ist, nur daß die beiden Spiegel durch Säulen von wenigstens 8 bis 10 ganz dünnen

Digitized by Google

Glimmerblättchen vertreten sind, die so auf einander liegen, daß die Ebene der optischen Aren für alle diese Blättchen dieselbe Lage hat. Vor der einen Glimmersäule wurde eine Wärmequelle, und hinter der anderen die Thermosäule aufgestellt. Von der Wärmequelle um die Brennweite abstehend war zwischen der Wärmequelle und der Glimmersäule eine Steinsalzlinse eingeschaltet, so daß die Wärmestrahlen als paralleles Bündel auf die Glimmersäule fielen. Wenn er nun der Glimmersäule eine solche Lage gab, daß das Strahlenbündel unter einem Winkel von ungefähr 34° auffiel, und die Mengen der zur Thermosäule gelangenden Strahlen berechnete, je nachdem die zweite Glimmersäule der ersten parallel war, oder sie kreuzte, so fand er, daß sich diese Mengen wie 100 zu 28 verhielten. 3) Melloni änderte den vorhergehenden Versuch dahin ab, daß er die Thermosäule so aufstellte, daß die von der zweiten Glimmersäule reflectirten Strahlen sie treffen mußten. Er fand, daß die Multiplicatornadel kaum oder gar nicht abwich, wenn die zweite Glimmersäule der ersten parallel war; kreuzten sich aber die beiden Säulen, so trat sofort eine bedeutende Abweichung der Nadel ein.

Diese Versuche zeigen unzweideutig auch eine Polarisation der Wärmestrahlen an, und zwar sowohl durch Brechung (Versuch 1 und 2), als auch durch Reflexion (Versuch 3). Durch Vergleichung des zweiten und dritten Versuchs ergibt sich noch die fernere Uebereinstimmung mit dem Lichte, daß auch die polarisirte Wärme in dem Falle, in welchem sie durchgelassen wird, nicht reflectirt wird, und umgekehrt. Es ist sogar geglückt, auch eine Circularpolarisation nachzuweisen, denn Biot und Melloni haben gezeigt, daß der senkrecht gegen die Are geschnittene Quarz eine ähnliche drehende Wirkung auf die polarisirte Wärme ausübt, wie auf das Licht. Ja diese Eigenschaft, die Wärmestrahlung zu modificiren, haben de la Provostaye und Desains auch bei den Flüssigkeiten gefunden, welche eine drehende Wirkung auf das polarisirte Licht ausüben.

§. 345. **Doppelte Brechung der Wärmestrahlen.** Bis vor wenigen Jahren hatte man noch keinen directen Beweis für die doppelte Brechung der Wärmestrahlen, d. h. dafür, daß ein Wärmestrahl bei seinem Durchgang durch gewisse Mittel in zwei verschiedene Strahlen gespalten werde. Auf indirectem Wege hatte man sich von ihrem Vorhandensein durch folgende Betrachtung überzeugt. Da die Körper doppelter Lichtbrechung die Eigenschaft haben, polarisirte Lichtstrahlen zu depolarisiren, so schloß man, daß, wenn es nun Körper gebe, welche polarisirte Wärmestrahlen depolarisiren, man diese füglich Körper mit doppelter Wärmebrechung nennen könne. Wird nämlich das Licht durch Reflexion polarisirt, und sind dann beide Platten, die polarisirende und die analysirende, des gewöhnlichen Polarisationsapparates parallel, so gelangt alles polarisirte Licht zum Auge; sind sie aber in einem rechten Winkel gegen einander gerichtet, so wird das Licht gänzlich verschluckt, man sieht ein dunkeles Feld. Bringt man alsdann in den polarisirten Strahl eine doppeltbrechende Krystallplatte, deren Are einen Winkel von 45° mit der Polarisationsebene bildet, so geht im ersten Falle, wenn die beiden polarisirenden Platten einander parallel sind, ein Theil des Lichtes verloren, im zweiten aber, wenn beide Platten sich kreuzen, wird ein gleicher Theil

Digitized by Google

gewonnen, beide Male offenbar durch Depolarisation. Ob in diesem Falle auch Wärmestrahlen gewonnen werden, und verloren gehen, ob also auch eine Depolarisation der Wärmestrahlen stattfindet, wurde durch ein dazwischen gebrachtes Glimmerblättchen untersucht. Von 157 Versuchen, deren 92 mit unsichtbaren Wärmestrahlen angestellt wurden, gab nur einer kein Resultat und einer ein negatives. Außer Glimmer zeigten auch Turmalinblättchen eine depolarisirende Kraft für Wärmestrahlen.

In der neuesten Zeit ist es jedoch Knoblauch gelungen, die doppelte Brechung der Wärmestrahlen auch auf directem Wege nachzuweisen. Er leitete mit Hilfe eines Heliostats einen Sonnenstrahl auf einen Kalkspath mit natürlichen Krystallflächen, und nahm mittelst eines Thermoscops mit einer schmalen zugeschärften Kante in der That zwei vollkommen von einander getrennte Strahlengruppen wahr, von welchen die eine bei der Drehung des Kalkspaths eine unveränderte Stellung behielt, während sich die andere um sie herumbewegte. Diese Erscheinungen traten bei einem senkrecht gegen die Are geschnittenen Krystalle für diejenigen Strahlen, welche der Are parallel sind, nicht ein, ebenso wenig wie in dieser Richtung eine doppelte Brechung der Lichtstrahlen stattfindet. Außerdem hat Knoblauch noch nachgewiesen, daß wie bei dem Lichte die beiden durch Doppelbrechung hervorgebrachten Strahlengruppen in zwei auf einander senkrechten Ebenen polarisirt sind.

Sechstes Kapitel.

Von den verschiedenen Quellen der Wärme.

§. 346. **Sonnenwärme.** Die vorzüglichste und bedeutendste aller Wärmequellen ist für uns die Sonnenwärme. Man hat Versuche gemacht, die Quantität der in einem Jahre zur Erde gelangenden Sonnenwärme zu berechnen. Wenn gleich die Resultate wegen der unsicheren Voraussetzungen, von welchen man jetzt noch bei dergleichen Berechnungen ausgehen muß, eine große Verschiedenheit zeigen, so sind sie doch wenigstens geeignet, uns einen ungefähren Begriff von der Mächtigkeit dieser Quelle beizubringen. Pouillet fand, daß die in einem Jahre zur Erde gelangende Sonnenwärme im Stande sei, eine 31 Meter dicke, um die Erde gelegte Eisschicht zu schmelzen; nach dem jüngeren Herschel würde sie sogar eine 103 Meter dicke solche Eisschicht zu schmelzen vermögen.

Der Grad der durch die Sonnenstrahlen bewirkten Erwärmung hängt sowohl von der materiellen Beschaffenheit der Körper, als auch von der Richtung, in welcher die Sonnenstrahlen auffallen, als auch endlich von der Dauer der Einwirkung ab. Körper nämlich, welche ein größeres Absorptionsvermögen besitzen (§. 338), müssen sich unter sonst gleichen Umständen natürlich stärker erwärmen, als andere. Wenn man z. B. die eine Kugel eines Differentialthermometers schwärzt, und dasselbe dann den Sonnenstrahlen aussetzt, so zeigt die Bewegung der Flüssigkeit sofort eine stärkere Erwärmung der geschwärzten Kugel an. Daß die Erwärmung von der Richtung der Sonnenstrahlen abhänge, und zwar desto bedeutender sei, je senkrechter diese auffallen, ist schon §. 336 erwähnt, und es wurde

Digitized by Google

dort gezeigt, daß sich daraus die Verschiedenheit der Temperatur an demselben Orte während der Dauer eines Tages erklären lasse. Aber auch die Abnahme der Temperatur von dem Aequator nach den beiden Polen hin und die Veränderung der Jahreszeiten muß aus derselben Ursache abgeleitet werden. In der heißen Zone, in welcher zur Mittagszeit die Sonnenstrahlen die Erdoberfläche das ganze Jahr hindurch nur in wenig verschiedener Richtung treffen, ist daher auch von verschiedenen Jahreszeiten in unserem Sinne keine Rede, und würde die Ebene des Aequators mit der Erdbahn zusammenfallen, statt dieselbe unter einem Winkel von $23\frac{1}{2}°$ zu schneiden, so würden auf der ganzen Erdoberfläche das ganze Jahr hindurch an demselben Orte die Sonnenstrahlen in derselben Richtung auffallen, und die Verschiedenheit der Jahreszeiten müßte verschwinden, wir in der geographischen Breite, welche wir bewohnen, hätten uns dann eines ewigen Frühlings zu erfreuen. Daß endlich auch die Dauer der Einwirkung auf die Erwärmung Einfluß hat, geht aus folgenden Thatsachen hervor. Nach der Richtung der Sonnenstrahlen sollte es Mittags 12 Uhr an jedem Tage, und gegen Ende Juni's in jedem Jahre am wärmsten sein. Die Erfahrung lehrt aber, daß dem nicht so ist, sondern daß das tägliche Maximum in der Regel zwischen 1 und 3 Uhr Nachmittags, und das jährliche etwa in der Mitte des Juli eintritt.

Es könnte die Frage entstehen, wie es komme, daß an einem Orte die Temperatur der Luft mit der Temperatur der Erdoberfläche selbst übereinstimme, da doch ersterer nach der Erfahrung die Eigenschaft der Diathermanität in hohem Grade zugeschrieben werden müsse. Allein theils ist sie kein absolut diathermaner Körper (einen solchen gibt es nicht), sondern absorbirt immer noch einen Theil der durch sie hindurchgehenden Wärmestrahlen (nach Pouillet gelangen nur $\frac{2}{3}$ der Sonnenwärme zur Erdoberfläche selbst), theils aber auch wird ein Theil der auf die Erdoberfläche auffallenden Wärmestrahlen nach der Luft reflectirt, und theils endlich strahlt die Erde nach der Luft hin Wärme aus, und zwar desto mehr, je größer der Temperaturunterschied zwischen beiden ist. Aus den beiden letzteren Ursachen erklärt sich auch, warum die Lufttemperatur in der Nähe der Erdoberfläche am größten ist, und nach der Höhe zu abnimmt, wenngleich ein bestimmtes Gesetz, nach welchem diese Abnahme erfolgt, noch nicht gefunden ist. Beobachtet man die Lufttemperatur an einem Orte stündlich, oder auch nur 4mal während des Tages, nämlich immer um 4 Uhr und um 10 Uhr, oder vermittelst des Thermometrographen (§. 302) nur das Maximum und Minimum der Temperatur an einem Tage, und zieht aus diesen Beobachtungen das arithmetische Mittel, so heißt dieses die mittlere Temperatur des Tages. Zieht man aus den mittleren Temperaturen aller Tage eines Monats das Mittel, so ist dieses die mittlere Temperatur des Monats und das Mittel aus den 12 Monatsmitteln eines Jahres gibt die mittlere Temperatur des Jahres. Wird aber aus einer ganzen Reihe solcher Jahresmittel das Mittel genommen, so ist dies die mittlere Temperatur des Ortes. So ist z. B. die mittlere Temperatur von Wiesbaden (freilich nur aus fünfjährigen Beobachtungen von 1842 bis 1846 bestimmt) = 8,09° R. oder 10,11° C., und diejenige von Frankfurt (nach achtjährigen Beobachtungen von 1837 bis 1844) = 7,5° R. oder 9,4° C. Mit der mittleren Temperatur des

Digitized by Google

Jahres stimmt am meisten das monatliche Mittel des April und des October überein; in Wiesbaden war z. B. die mittlere Jahrestemperatur von 1846 = 9,30° R., die mittlere Temperatur des April = 8,72° und diejenige des October = 9,51°. Nach der mittleren Temperatur eines Ortes bestimmt sich vorzugsweise das Klima desselben, doch hat auch die gleichmäßigere oder ungleichmäßigere Vertheilung der Wärme während des Jahres einen Einfluß darauf. Verbindet man, wie Alex. von Humboldt zuerst gethan hat, alle Orte der Erdoberfläche, welche eine gleiche mittlere Temperatur haben, durch eine Linie, so heißt eine solche Linie eine Isotherme (ἴσος gleich, θέρμη Wärme). Die Isothermen sind Linien von sehr unregelmäßiger Krümmung, und beweisen dadurch, daß auf die mittlere Temperatur eines Ortes nicht nur seine Entfernung von dem Aequator (sonst müßten die Isothermen mit den Parallelkreisen zusammenfallen), sondern auch noch viele andere Umstände Einfluß haben, z. B. die Höhe über der Meeresoberfläche, die Kultur und Beschaffenheit des Bodens, die Entfernung von dem Meere u. s. w. Man hat auch diejenigen Orte durch Linien verbunden, welche gleiche Sommerwärme, und diejenigen, welche gleiche Winterkälte haben. Die ersteren Linien nennt man Isotheren (ἴσος gleich, θέρος Sommer), die letzteren Isochimenen (ἴσος gleich, χεῖμα Winter).

Es könnte auffallend erscheinen, daß die Strahlen des Mondes, welche doch nur reflectirte Sonnenstrahlen sind, gar keine Wärmewirkung zu haben scheinen, während sie doch noch ziemlich viel Licht verbreiten. Doch hat Melloni nachgewiesen, daß ihnen nicht alle Wärmewirkung abgeht, wenngleich dieselbe äußerst unbedeutend ist, und nur durch die empfindlichsten Apparate nachgewiesen werden kann. Erklärlich wird die Erscheinung, wenn man bedenkt, daß ein und derselbe Körper für Licht und Wärme ein sehr verschiedenes Absorptionsvermögen besitzen kann.

§. 347. **Erdwärme.** 1) Die meisten Mineralquellen und alle arteſischen Brunnen haben eine die mittlere Temperatur des Ortes übersteigende Wärme. 2) Bis zu einer Höhe von 6000 Fuß schmilzt das Eis unter den Gletschern da, wo es den Boden berührt, beständig ab. 3) Wird die Temperatur in Bohrlöchern und Bergwerksschachten in verschiedenen Tiefen untersucht, so zeigt sich eine Zunahme derselben mit der Tiefe.

Diese und noch andere Erscheinungen weisen Wärme in dem Inneren der Erde nach. Daß diese Wärme nicht die in den Boden eingedrungene, und von da nach dem Inneren fortgeleitete Sonnenwärme ist, geht daraus hervor, daß nach genauen Beobachtungen sich die täglichen Variationen der Sonnenwärme nur bis zu einer Tiefe von einem Meter, und die jährlichen bis höchstens zu einer Tiefe von 25 Metern bemerklich machen. Der Grund dieses langsamen Eindringens der äußeren Wärme kann aber kein anderer sein, als das schlechte Wärmeleitungsvermögen der die Erdrinde zusammensetzenden Stoffe, welches namentlich auch durch die Thatsache erwiesen ist, daß in einer Tiefe von 8 Metern die Jahreszeiten grade umgekehrt gefunden werden, die höchste Temperatur nämlich im Januar, und die geringste am Ende Juni's. Zur Erklärung der obigen Erscheinungen bleibt demnach Nichts übrig, als der Erde eine ihr eigenthümliche Wärme zuzuschreiben. Die unter 3 angeführte Erfahrung zeigt auch noch, daß sie mit der Tiefe immer mehr zunimmt, und zwar im Mittel aus einer gro-

Digitized by Google

ßen Reihe von Beobachtungen für jede 32 Meter Tiefe etwa um 1°. Die Tiefen, bis zu welchen man bis jetzt in die Erde eingedrungen ist, sind jedoch zu unbedeutend, um beurtheilen zu können, ob die Temperatur nach dem Inneren zu stets in demselben Verhältniß wachse. Wäre dies der Fall, so müßte schon in einer Tiefe von 3200 Metern die Temperatur des siedenden Wassers herrschen, und in dem Mittelpunkt selbst müßten alle Körper glühend sein, und im geschmolzenen Zustande sich befinden. Man hat deßhalb auch die Hypothese aufgestellt, daß die Erde sich ursprünglich in einem geschmolzenen Zustande befunden habe, und nur nach und nach erkaltet, und dadurch fest geworden sei. Die Befürchtung, daß ja dann auch ein Zeitpunkt eintreten müsse, in welchem sie in Kälte erstarre, und nicht mehr die Wohnstätte für Thiere und Pflanzen sein könne, ist ungegründet, da sie ja offenbar nur so lange erkalten kann, bis ihr der Wärmeverlust, welchen sie durch Ausstrahlung erleidet, stets wieder in gleichem Maße durch die Sonne ersetzt wird. Dieser Zeitpunkt scheint aber schon seit sehr langer Zeit eingetreten zu sein. Wenigstens hat Laplace durch Zusammenstellung älterer astronomischer Messungen bewiesen, daß seit 2000 Jahren die Dauer des Tages nicht um $\frac{1}{300}$ Secunde kleiner geworden ist. Würde aber während dieser Zeit die Erkaltung der Erde fortgeschritten sein, so müßte sie sich zusammengezogen haben, die Erdaxe selbst müßte kleiner geworden sein, und in Folge davon müßte sich die Erde jetzt schneller um ihre Axe drehen, die Dauer eines Tages also kleiner sein.

§. 348. **Wärmeerzeugung durch chemische Processe.** 1) Gießt man zu Wasser Schwefelsäure, so wird eine ziemlich beträchtliche Temperaturerhöhung beobachtet. 2) Terpentinöl wird durch starke Salpetersäure bis zur Entzündung erhitzt. 3) Chlorsaures Kali, mit Schwefelsäure in Berührung gebracht, erzeugt so viele Wärme, daß man damit Schwefel anzünden kann (chemisches Feuerzeug).

Die hier angeführten Fälle von Wärmeerzeugung bei der chemischen Einwirkung zweier Körper auf einander sind nur die bekanntesten aus einer großen Anzahl. Verbinden sich nämlich zwei Substanzen chemisch mit einander, so werden ihre physicalischen Eigenschaften verändert. Der neu entstehende Körper kann andere Aggregatform, andere Dichtigkeit, Härte u. s. w. haben, als seine Bestandtheile. Diese Veränderung der äußeren Beschaffenheit ist aber stets mit einer Veränderung des Wärmezustandes verbunden. Es ist dies zwar nicht nothwendig eine Temperaturerhöhung, sondern kann auch eine Temperaturerniedrigung sein, wie wir in Beziehung darauf, daß ein Bestandtheil oder auch beide die Aggregatform ändern, an Beispielen bereits in §. 308 und 309 nachgewiesen haben. Wenn indeß diese Wärmeveränderung nicht in allen Fällen wahrgenommen wird, so rührt dies wohl daher, daß in vielen Fällen die chemische Veränderung der Körper so langsam vor sich geht, daß die Temperatur der Körper, sei sie höher oder niedriger geworden, sich mit derjenigen der Umgebung wegen der zu geringen Differenz zu schnell wieder ausgleicht, um eine Temperaturveränderung wahrnehmen zu lassen. Ueber die Größe der Wärmeentwicklung bei der Verbindung zwischen zwei bestimmten Substanzen hat Heß das Gesetz aufgestellt, daß, wenn eine Verbindung stattfindet, die entwickelte Wärmemenge constant ist, mag nun die Verbindung direct oder indirect, plötzlich oder allmählig statt-

Digitized by Google

finden. So zeigte er, daß, wenn man englische Schwefelsäure mit einem Aequivalent Wasser mischt, dann ein zweites Aequivalent Wasser zusetzt u. s. w., bis keine merkliche Wärmeentwicklung mehr stattfindet, die Summe der nach und nach frei werdenden Wärmemengen grade ebenso groß ist, wie die Wärmemenge, welche frei wird, wenn man dieselbe Wassermasse nicht nach und nach, sondern auf einmal zusetzt.

§. 349. **Fortsetzung; Verbrennung.** Das am häufigsten in Anwendung kommende Mittel, uns Wärme auf künstlichem Wege zu verschaffen, ist der Verbrennungsproceß. Man versteht im Allgemeinen darunter jede Verbindung zweier Körper, welche von Licht- und Wärmeentwicklung begleitet ist. Wir beschränken uns jedoch auf die bei Weitem zahlreichsten Fälle, in welchen der eine Körper der Sauerstoff ist, sehen aber auch von derjenigen Erweiterung des Begriffes der Verbrennung ab, nach welcher man jede Verbindung eines Körpers mit Sauerstoff, selbst wenn sie ohne Licht- und Wärmeentwicklung erfolgt, eine Verbrennung nennt. Von den Bestandtheilen der gewöhnlichen Brennmaterialien, deren wir uns zur Erzeugung der Wärme bedienen, sind diejenigen Körper, welche die Verbindung mit dem Sauerstoff eingehen (die brennbaren Körper), die Kohle, das Wasserstoffgas, und die Verbindungen beider, also die verschiedenen Kohlenwasserstoffgase.

Um über die Güte verschiedener Brennmaterialien, und ihren dadurch bedingten Werth urtheilen zu können, ist es von großer Wichtigkeit, ein Mittel zu besitzen, durch welches man die unter gleichen Umständen von denselben entwickelten Wärmemengen auffinden kann. Zu diesem Zwecke bedient man sich des Rumford'schen Calorimeters. Es ist dies ein kupferner Kasten, an dessen Boden sich eine schlangenförmig gewundene, horizontal liegende, kupferne Röhre befindet, deren eines Ende durch den Boden des Kastens in Form eines Trichters hindurchgeht, während das andere Ende durch die eine Seitenwand des Kastens austritt. In den Kasten kommt eine abgewogene Menge Wasser, dessen Temperatur vorher zu Anfang des Versuches genau bestimmt wird, der zu verbrennende Körper kommt unter den Trichter, und man beobachtet nun, welche Temperaturerhöhung das Wasser durch die Verbrennung erfährt. Aus der Temperaturerhöhung, welche Wasser und Kasten erfahren, und aus dem Gewichte beider, läßt sich dann, wie schon früher gezeigt ist, die Wärmemenge berechnen, welche bei der Verbrennung des Körpers erzeugt wurde. Auf solche Weise hat man gefunden, daß die von gleichen Gewichten folgender Substanzen, Holzkohlen, beste Steinkohlen, geringere Sorte von Steinkohlen, vollkommen trocknes Holz, lufttrocknes Holz und Torf, bei der Verbrennung erzeugten Wärmemengen sich verhalten wie 75 : 70 : 60 : 36 : 29 : 15.

Die Verbrennung kann erst anfangen, wenn die Temperatur des brennbaren Körpers einen bestimmten Grad erreicht hat. Bei einigen Körpern reicht hierzu schon die gewöhnliche Lufttemperatur hin, so daß sie sich von selbst entzünden, sobald sie mit der Luft in Berührung kommen. Man nennt sie Pyrophore (πῦρ Feuer, φορός tragend) oder Selbstzünder. Einer der bekanntesten ist Homberg's Pyrophor, den man durch gelindes Glühen von Kali-Alaun mit Kohlenpulver oder Zucker erhält, und dann natürlich unmittelbar nach seiner Bereitung in einem verschlossenen Gefäße aufbewahrt. Die meisten Körper bedürfen aber eine

Digitized by Google

Temperaturerhöhung, um zu verbrennen. Die Größe dieser Temperaturerhöhung ist jedoch bei verschiedenen Körpern verschieden, bei den festen Körpern im Allgemeinen geringer, als bei den ausdehnsam flüssigen. So entzündet sich Phosphor schon bei 37½°, Schwefel bei 294°, Wasserstoffgas bei 300°. Ist aber der Verbrennungsproceß einmal eingeleitet, so entwickeln die meisten Körper beim Verbrennen selbst so viel Wärme, um sich auf der zu dem Verbrennen erforderlichen Temperatur zu erhalten. Von den gewöhnlichen Brennmaterialien macht jedoch die Kohle in dieser Hinsicht eine Ausnahme. Eine einzelne glühende Kohle erlischt an der Luft von selbst, weil sie durch ihr großes Ausstrahlungsvermögen sich bald unter ihre Entzündungstemperatur abkühlt. Liegen dagegen mehrere glühende Kohlen auf einem Haufen, so brennen sie fort, weil die von den unteren ausgestrahlte Wärme den andern zuwächst. Bei unseren Kerzen wird durch die bei dem Verbrennen entwickelte Wärme der feste Körper (Talg, Stearin, Wachs) geschmolzen, steigt dann in den Zwischenräumen der einzelnen Fäden des Dochtes wie in Haarröhrchen in die Höhe, durch die in der Nähe der Flamme größere Wärme werden dann die geschmolzenen Körper in brennbare Gase zersetzt, die endlich die Verbindung mit dem Sauerstoff der Luft eingehen. Bei unseren Lampen ist der Proceß ein ganz ähnlicher, nur findet hier keine vorgängige Schmelzung statt, weil bei ihnen ja kein fester, sondern ein tropfbar flüssiger Körper in Anwendung kommt.

Zum Verbrennungsproceß ist aber nicht nur eine bestimmte Temperatur erforderlich, sondern eben so sehr auch Zufluß von Sauerstoff in hinreichender Menge und mit der nöthigen Geschwindigkeit, und Berührung zwischen diesem und dem Brennstoff. Für den Zufluß von Sauerstoff sorgt wieder die entwickelte Wärme, indem dadurch die den Körper umgebende Luft, die theilweise schon ihren Sauerstoff an denselben abgegeben hat, erwärmt wird, und dadurch in die Höhe steigt, so daß fortwährend von allen Seiten frische Luft, und mit derselben natürlich auch Sauerstoff zu dem Körper hinströmt. Da dies indessen für solche Körper, welche zu ihrer Verbindung eine verhältnißmäßig große Menge Sauerstoff bedürfen, nicht ausreicht, und da überhaupt die durch das Verbrennen erzeugte Hitze um so größer ist, je lebhafter das Verbrennen von Statten geht, d. h. je schneller und vollkommner die brennbaren Körper sich mit Sauerstoff verbinden, dies aber vorzugsweise von der Menge der zuströmenden Luft, so wie von der raschen Entfernung aller anderen Dämpfe und Gase abhängt, welche dem Sauerstoff den Zutritt zu dem brennenden Körper versperren, so trifft man, um diese Zwecke zu erreichen, noch besondere Vorrichtungen. Dahin gehört z. B., daß man den Brennstoff in einem geschlossenen Raume auf einen Rost legt, damit die Luft gezwungen werde, unter dem Brennstoff einzutreten, und denselben zu berühren; dahin gehören die Schornsteine, um die Geschwindigkeit der aufsteigenden, des Sauerstoffs bereits beraubten Luft, und dadurch auch den Zufluß frischer Luft zu vermehren; dahin gehört ferner die Anwendung der Blasebälge und Gebläse, um den Zufluß der Luft auf künstliche Weise zu vermehren. Wird dem brennenden Körper statt kalter Luft erwärmte Luft zugeführt, so hat dies ebenfalls einen vortheilhaften Einfluß auf die Verbrennung, indem dem Brennstoff keine, oder wenigstens doch nur eine geringere Menge

Digitized by Google

von Wärme entzogen zu werden braucht, um die Temperatur der zugeführten Luft zu erhöhen. Der bedeutende Einfluß dieser Vorrichtungen zeigt sich deutlich bei einer Vergleichung der gewöhnlichen Küchenlampe mit der Argand'schen Lampe oder der Lampe mit doppeltem Luftzug. Die erstere, welche einen Docht aus zusammengedrehten Baumwollenfäden hat, brennt mit einer wenig leuchtenden und wenig wärmenden Flamme, bildet einen übelriechenden Rauch, und setzt auf dem Dochte viel unverbrannte, feste Kohle ab. Bei der letzteren, bei welcher der Docht die Gestalt eines hohlen Cylinders hat, so daß die Luft von Außen und von Innen Zutritt zu der Flamme erhält (doppelter Luftzug), und bei welcher ein Glascylinder über die Flamme gesetzt wird, hört alles Rauchen auf, und die Flamme entwickelt mehr Licht und Wärme, als zuvor. Man kann sich aber auch direct sowohl von der Wirksamkeit des zweiten inneren Luftzuges, als auch von derjenigen des Glascylinders überzeugen, indem man entweder die Löcher, durch welche die Luft in das Innere strömt, zustopft, oder den Glascylinder abnimmt. Daß Alles, was einen brennenden Körper unter die Verbrennungstemperatur abkühlt, oder den Zufluß des Sauerstoffs von ihm abhält, oder ihn vor der Berührung mit dem Sauerstoff schützt, feuerlöschend wirken muß, ist aus dem Vorhergehenden klar. Der erstere Zweck wird z. B. dadurch erreicht, daß man den brennenden Körper mit Wasser begießt, indem dieses sich in Dampf verwandelt, dazu aber eine beträchtliche Wärmemenge nöthig hat (§. 322); der letztere dadurch, daß man den brennenden Körper mit Sand, Mist u. s. w. bedeckt, daß man, wenn es in einem Kamine brennt, dasselbe schließt, oder auf dem Heerde Pulver oder Schwefel abbrennt, indem die aus dieser Verbrennung entwickelten Gase die Flamme einhüllen, und vor der Berührung mit dem Sauerstoff schützen.

Die Verbrennung erfolgt nur bei den gasförmigen Körpern mit Flamme, bei feuerbeständigen, nicht flüssigen, festen Körpern entsteht bloß ein Glühen. Wenn wir dessenungeachtet feste Körper, wie Holz, mit Flamme brennen sehen, so ist dies nur scheinbar, denn diese werden erst durch das Erhitzen in gasförmige Bestandtheile zersetzt, und diese letzteren sind es, welche bei der Verbrennung sich mit dem Sauerstoff verbinden. Die Flamme zeigt sich bei näherer Untersuchung als aus verschiedenen Theilen zusammengesetzt. Die einfachste Flamme ist die von brennendem Wasserstoffgase. Sie besteht aus einem inneren nicht leuchtenden Theile und dem äußeren Theile, welcher ersteren wie eine leuchtende Hülle umgibt. Man kann sich davon überzeugen, wenn man horizontal durch die Flamme ein feines Drahtnetz hält (§. 331). Man sieht dann in der Mitte einen dunkelen Kreis, welcher von einem leuchtenden Ringe umgeben ist. Das Gas kann ja auch offenbar nur da verbrennen, wo es mit der Luft in Berührung ist, und der innere, nicht leuchtende Theil ist das unvermischt ausströmende Gas. Hält man einen Platindraht durch die Flamme, so glüht dieser daher auch nur an den Rändern der Flamme, nicht aber in der Mitte. Die zugespitzte Form der Flamme erklärt sich daraus, daß das in Form eines Cylinders aufsteigende Gas nach und nach verbrennt, und also desto mehr abnimmt, je höher es steigt. Zusammengesetzter ist die Flamme unserer Kerzen und Lampen. Sie besteht 1) aus einem dunkelen kegelförmigen Kern, 2) aus einem hellblauen Theil, der sich unten am Dochte und rings um diesen herum befindet, 3) aus einem starkleuchtenden Theile, welcher den dunkelen

Digitized by Google

Kegel umgibt, sich über ihn emporhebt, und dann spitz zuläuft, und endlich 4) aus einer diesen helleuchtenden Theil umgebenden, sehr wenig leuchtenden Hülle. Nur in dem letzten Theile, welcher mit der Luft in Berührung ist, findet die Verbrennung statt. In dem blauen Theil ist die Hitze noch nicht auf den zum vollkommenen Verbrennen erforderlichen Grad gestiegen, weil der Luftwechsel in dieser Gegend nicht lebhaft genug ist. Aus dem dunkelen Kern steigen fein vertheilte Kohle und die übrigen gasförmigen Zersetzungsproducte des Brennstoffs auf, und gelangen in den den dunkelen Kern umgebenden Theil, in welchem die Kohlentheile durch die Hitze der umgebenden Hülle in's Glühen kommen, wodurch grade dieser Theil die größte Leuchtkraft erhält.

§. 350. **Thierische Wärme.** Läßt man eine Person die Kugel eines Thermometers unter die Zunge bringen, und den Mund schließen, und wartet nun, bis das Thermometer nicht mehr steigt, so wird man finden, daß das Thermometer ungefähr bei 37° stehen bleibt.

Man hat diesen Versuch an gar verschiedenen Orten der Erde, die ein sehr verschiedenes Klima hatten, und mit Personen jeden Alters und Geschlechts vielfach wiederholt, und stets fast genau dasselbe Resultat erhalten. Bei der Untersuchung der Blutwärme einer großen Anzahl der verschiedensten Säugethiere und Vögel fand schon John Davy, daß sie auch bei diesen Thierklassen ziemlich constant sei, bei den Säugethieren etwa 39°, und bei den Vögeln 42° betrage. Bei den übrigen Thierklassen dagegen war stets die Temperatur des Körpers nur wenig von der Temperatur der Umgebung verschieden. Da wir also bei den Menschen, den übrigen Säugethieren und Vögeln eine Temperatur beobachten, welche die äußere und zwar oft nicht um ein Geringes übertrifft, und das nicht bloß unter gewissen Umständen, sondern zu allen Zeiten, so kann diese Wärme unmöglich von Außen herstammen, sondern muß in dem Innern des Körpers selbst erzeugt werden. Schon lange hatte man beobachtet, daß das, was der Mensch ausathmet, nicht nur die unveränderte atmosphärische Luft ist, sondern weniger Sauerstoff, dagegen einen Antheil Kohlensäure enthält. Deßwegen glaubte man früher, die Quelle dieser thierischen Wärme in dem Athmungsprocesse zu finden. Freilich muß auch, indem sich ein Theil des Sauerstoffs der eingeathmeten Luft mit dem in dem Blute enthaltenen Kohlenstoffe zu Kohlensäure verbindet, also ein Verbrennungsproceß stattfindet, Wärme erzeugt werden, allein Despretz und Dulong haben gezeigt, daß dieses doch nicht die einzige Quelle der thierischen Wärme sein kann. Weil die Temperatur des Thierkörpers größer ist, als diejenige seiner Umgebung, so muß derselbe fortwährend Wärme an diese Umgebung abgeben, und zwar um so mehr, je größer der Unterschied der Temperaturen ist, also zu verschiedenen Zeiten verschieden viel. Durch den Athmungsproceß kann aber, da die Verhältnisse stets dieselben sind, in gleichen Zeiten immer nur gleich viel Wärme erzeugt werden. Ginge nun von dieser Wärme bald mehr, bald weniger an die äußere Umgebung verloren, so müßte der Thierkörper bald eine niedrigere, bald eine höhere Temperatur zeigen. Es ist dies aber gegen die Erfahrung, da die Temperatur des Thierkörpers unter allen Umständen als constant beobachtet wurde. Wenn also mehr Wärme verloren geht, muß auch mehr wieder ersetzt, d. h. eine größere Quantität erzeugt werden. Man nimmt daher auch jetzt allgemein mit Liebig an, daß die Entwicklung der thierischen Wärme die Folge der Verbindung des

Digitized by Google

Kohlenstoffes und Wasserstoffes mit dem Sauerstoffe zu Kohlensäure und Wasser sei. Der Ersatz des bei dieser fortdauernden, im Innern des Körpers vorgehenden Verbrennung verbrauchten Brennmaterials, des Kohlenstoffes und des Wasserstoffes, wird dem Körper durch die Nahrungsmittel geliefert, und zwar sind hierzu besonders die stickstofffreien geeignet, weil sie zur Blutbildung untauglich sind, also Fett, Stärke, Zucker u. s. w. Die Verbrennungsproducte, die Kohlensäure und das Wasser, werden aus dem Körper durch das Ausathmen und die Hautausdünstung wieder abgesondert. Je mehr nun der Körper Wärme erzeugen muß, desto mehr Brennmaterial, also desto mehr Nahrungsmittel müssen ihm zugeführt werden. Wir finden daher jetzt auch die größere Eßlust im Freien, bei Bewegung und Anstrengung, und bei größerer Kälte erklärlich, und wundern uns nicht mehr, wenn wir lesen, daß die Nordländer mit gesundem Appetite große Quantitäten Speck verzehren.

§. 351. **Noch andere Quellen der Wärme.** 1) Beim Schmieden der Metalle und beim Prägen der Münzen findet eine beträchtliche Wärmeentwickelung statt. 2) Percussionspulver wird durch einen kräftigen Schlag, Knallsalze durch den geringsten Stoß entzündet. 3) Nimmt man eine cylindrische, am einen Ende verschlossene Röhre, in welcher sich ein Kolben luftdicht auf- und abbewegen läßt, und drückt in derselben die Luft bis etwa $\frac{1}{4}$ des Volumens rasch zusammen, so wird so viel Wärme frei, daß ein an der unteren Fläche des Kolbens befestigtes Stückchen Schwamm sich entzündet (pneumatisches Feuerzeug, πνεῦμα, bewegte Luft). 4) Eine Kohle von Buchenholz erwärmt sich, während sie Gase absorbirt, um mehrere Grade. 5) Bei Döbereiner's Zündmaschinen strömt Wasserstoffgas gegen fein vertheiltes Platin (den Platinschwamm), und dadurch wird so viel Wärme frei, daß das Gas sich entzündet. 6) Die Wilden verschaffen sich dadurch Feuer, daß sie 2 Stücke trockenes Holz rasch an einander reiben. 7) Güterwägen haben sich öfters schon durch zu starke Reibung der Räder an ihren Aren von selbst entzündet. 8) Rumford brachte im Jahre 1798 durch die Reibung eines Bohrers in einem 9,8 Zoll langen und 7,75 Zoll dicken Cylinder von Kanonenmetall 19 Pfund Wasser zum Sieden.

Eine Wärmequelle haben wir früher schon kennen gelernt, an die hier nur erinnert werden soll, es ist dies die Electricität. Das Gemeinsame der in 1, 2 und 3 aufgeführten Erscheinungen besteht darin, daß die Körper durch Stoß oder Schlag verdichtet oder comprimirt werden, weßhalb man wohl auch die erzeugte Wärme Compressionswärme nennt. Wir erklären uns die hier auftretende Wärme dadurch, daß, wie wir gesehen haben (§. 329), durch die Verdichtung die Wärmecapacität der Körper abnimmt, sie demnach einen Theil ihrer Wärme abgeben müssen. Es darf wohl angenommen werden, daß bei der Verdichtung so viel Wärme frei werde, als erforderlich sein würde, um den Körper um die Größe der Verdichtung auszudehnen. Die frei werdende Wärme müßte sich demnach aus dem bekannten Ausdehnungscoefficient eines Körpers und der Größe der Verdichtung berechnen lassen. Wenn wir in 4 die Kohle bei der Absorption eines Gases sich erwärmen sehen, so hat auch die hier entwickelte Wärme höchst wahrscheinlich ihren Grund darin, daß das Gas durch die Absorption verdichtet wird, so daß wir es gewissermaßen auch hier mit der Compressionswärme zu thun haben. Die Platina-Zündmaschine erklärt

Digitized by Google

ſich auf gleiche Weiſe, da ſein vertheiltes Platin ein großes Abſorptionsvermögen für Waſſerſtoffgas beſitzt. In den 3 letzten der angeführten Erfahrungen endlich tritt uns noch eine neue Wärmequelle, die Wärmeerzeugung durch Reibung, entgegen. Den inneren Grund dieſer Wärmeentwickelung anzugeben, iſt noch nicht gelungen. Nach Becquerel iſt die erzeugte Wärmemenge ſowohl von der Wärmeleitungsfähigkeit, als auch von der Wärmecapacität der ſich reibenden Körper ganz unabhängig, und nach neueren Verſuchen von Joule ſtets der zur Reibung angewandten Kraft proportional.

Siebentes Kapitel.

Von den durch die Wärme bedingten atmoſphäriſchen Erſcheinungen.

§. 352. **Winde, Land- und Seewinde, Paſſatwinde.** So lange die über uns befindliche atmoſphäriſche Luft keine andere Bewegung annimmt, als daß ſie ſich zugleich mit uns um die Erdaxe dreht, halten wir ſie trotz dieſer Bewegung doch für ruhend, weil dann dieſelben Lufttheilchen immer ihre Stelle über denſelben Orten der Erdoberfläche beibehalten. Wenn aber die Lufttheilchen ihre Lage zu der Erdoberfläche verändern, dann ſchreiben wir ihnen erſt Bewegung zu. Die in Bewegung befindliche Luft iſt das, was wir Wind nennen. Solche Bewegungen, oder, wie man ſie, da wir es mit einem flüſſigen Körper zu thun haben, gewöhnlicher nennt, Strömungen, können aber entſtehen, wie bereits früher gezeigt wurde, wenn an irgend einer Stelle die Temperatur erhöht wird, denn dann werden die Lufttheilchen an dieſer Stelle durch die größere Wärme ausgedehnt, dadurch ſpecifiſch leichter, und ſteigen deßhalb in die Höhe. Von allen Seiten müſſen demnach die kälteren Lufttheilchen nach dieſer wärmeren Stelle hinſtrömen. Aus der folgenden Auseinanderſetzung wird ſich aber ergeben, daß dies wirklich der vorzüglichſte Entſtehungsgrund für die Winde iſt.

Nach der Erfahrung weht auf Inſeln und in Küſtengegenden, beſonders zwiſchen den Wendekreiſen, aber auch in höheren Breiten und ſelbſt noch in Italien, ja auch mitten im Lande an größeren Seeen regelmäßig am Tage ein ſchwacher Wind, eine Briſe, von dem Waſſer nach dem Lande, während der Nacht aber von dem Lande nach dem Waſſer. Man hat deßhalb auch dieſen regelmäßig wiederkehrenden Winden den Namen Land- und Seewinde beigelegt. Dieſe Erſcheinung erklärt ſich vollſtändig durch das verſchiedene Verhalten von Waſſer und Land zu den Wärmeſtrahlen. Die Sonnenſtrahlen werden nämlich von dem undurchſichtigen Geſtein größtentheils abſorbirt, und erhöhen dadurch die Temperatur deſſelben ſehr bedeutend. Dadurch muß aber auch die Wärme der am Boden befindlichen Luftſchichten ſehr erhöht werden. Anders dagegen iſt es auf dem Meere. Die Wärmeſtrahlen dringen bis zu einer bedeutenden Tiefe in das Waſſer ein, wodurch ſich natürlich die Oberfläche und die benachbarten Luftſchichten weniger ſtark erwärmen. Außerdem wird aber auch durch die an der Oberfläche des Waſſers ſtattfindende Verdunſtung noch viele Wärme den benach-

Digitized by Google

harten Luftschichten entzogen, und auch dadurch ihre Temperatur erniedrigt. Während der Einwirkung der Sonne also, d. h. am Tage, erwärmt sich die Luft über dem Lande stärker, als über dem Meere, sie steigt in die Höhe. Zum Ersatz derselben, und um das gestörte Gleichgewicht wieder herzustellen, strömt die kältere, über dem Wasser lagernde Luft nach dem Lande, es entsteht ein Seewind. Die Körper aber, welche ein größeres Absorptionsvermögen haben, besitzen auch ein größeres Ausstrahlungsvermögen (§. 338). In der Nacht wird sich daher das Festland durch Strahlung stärker abkühlen, als das Wasser. Dadurch wird wieder eine Differenz in der Temperatur der mit der Oberfläche beider in Berührung stehenden Luftschichten erzeugt, nur muß jetzt die Luft über dem Meere eine höhere Temperatur annehmen, als die über dem Lande, und, indem sie in die Höhe steigt, muß demnach eine Strömung von dem Lande nach dem Meere hin eintreten, es muß sich ein Landwind erheben. Daß Land- und Seewind nicht plötzlich in einander übergehen, sondern daß Morgens und Abends Zeitpunkte eintreten müssen, in welchen die Luftschichten über dem Wasser und über dem Lande eine gleiche Temperatur haben, daß also Land- und Seewind durch eine Windstille von einander getrennt sind, ferner daß die Stärke dieser Winde von der Größe der Temperaturdifferenz bedingt ist, daß also der Seewind zur Zeit der größten Tageswärme am stärksten sein muß, braucht wohl nicht näher erwähnt zu werden.

Eine weitere Erfahrung lehrt, daß in der heißen Zone auf dem atlantischen Ocean und dem stillen Meere das ganze Jahr hindurch nördlich von dem Aequator ein Nordost- und südlich von dem Aequator ein Südostwind weht. Doch sind die Regionen dieser beiden Winde durch einen Zwischenraum getrennt, in welchem Windstillen unaufhörlich mit heftigen Windstößen und Orkanen abwechseln. Man nennt diesen Zwischenraum die Region der Calmen (von dem englischen Wort calm ruhig, still), und jene beständig wehenden Nordost- und Südostwinde Passatwinde (wahrscheinlich so genannt, weil man sie in der Schifffahrt benutzte, um das atlantische Meer nach Amerika hin zu passiren). Weil zwischen den Wendekreisen der Winkel, unter welchem die Sonnenstrahlen auf die Erdoberfläche auffallen, am größten ist, ist auch hier die durch die Sonnenstrahlen bewirkte Erwärmung am größten (§. 336). Es muß demnach die stark erwärmte Luft in die Höhe steigen, sich durch ihre gleichzeitige Ausdehnung über die kälteren Luftmassen zu beiden Seiten erheben, und oben von dem Aequator nach den beiden Polen hin abfließen. Die Folge davon muß natürlich auch hier sein, daß von allen Seiten die kältere Luft nach dem Aequator hinströmt. Hiernach müßte aber nördlich von dem Aequator kein Nordostwind, sondern ein beständiger Nordwind, und südlich von demselben kein Südostwind, sondern ein beständiger Südwind wehen. Es muß also entweder die angegebene Ursache nicht die richtige sein, oder es muß noch eine weitere Ursache mitwirken, durch welche die Veränderung der Richtung von Nord und Süd in eine von Nordost und Südost bewirkt wird. Diese zweite Ursache liegt nun in der Arendrehung unserer Erde. Bei dieser Bewegung beschreibt jeder Punkt der Erdoberfläche innerhalb 24 Stunden eine Kreislinie, dessen Ebene senkrecht zur Erdare ist, und die ihren Mittelpunkt auf der Are hat. Diese Kreislinien sind aber von sehr verschiedener Länge, je nachdem der Punkt mehr nach dem Aequator oder mehr nach einem Pole zu liegt. Für die Punkte am

Digitized by Google

Aequator beträgt die Länge derselben 5400 geographische Meilen, an den Polen selbst hat sie sich bis zu einem Punkte zusammengezogen. Die Kugelhülle, welche die Luft um die Erde bildet, theilt diese Bewegung, und die einzelnen Lufttheilchen bewegen sich auch mit Geschwindigkeiten, welche denjenigen der Punkte der Erdoberfläche proportional sind, über welchen sie sich befinden. Wenn sich demnach Lufttheilchen aus höheren Breiten gegen den Aequator hin bewegen, so kommen sie mit geringerer Geschwindigkeit über Punkten der Erdoberfläche an, welche sich mit größerer Geschwindigkeit von West nach Ost bewegen. Die Lufttheilchen bleiben bei dieser drehenden Bewegung zurück, und treffen nicht diejenigen Punkte des Aequators, auf welche sie ursprünglich gerichtet waren, sondern mehr westlich gelegene. Dadurch aber, daß sie in westlich gelegenen Punkten ankommen, scheinen sie von östlich gelegenen herzukommen. Diese östliche Richtung combinirt sich dann natürlich mit der ursprünglich nördlichen oder südlichen zu einer nordöstlichen oder südöstlichen. Je weiter sich die Lufttheilchen nach dem Aequator zu bewegen, desto mehr bleiben sie natürlich zurück, sie treffen auf immer weiter westlich gelegene Punkte, wodurch dann ihre Richtung für uns eine immer mehr östliche wird. Wo demnach der Nordost- und Südostpassat in der Mitte zusammentreffen, muß die Richtung des Windes eine rein östliche geworden sein. Wenn dessenungeachtet in der Region der Calmen kein Ostwind, sondern Windstille beobachtet wird, so erklärt sich das auf folgende Weise. Hier wird die Luft am stärksten erwärmt, hier ist also auch der aufsteigende Luftstrom am lebhaftesten. Diese verticale Bewegung muß aber natürlich die horizontale vermindern und neutralisiren, es muß in dieser Region mehr oder weniger windstill werden. Die Windstille wechselt jedoch beständig mit heftigen Windstößen und Orkanen, und für diese findet sich in dem Bisherigen kein Erklärungsgrund. In der Region der Calmen stürzen aber nach den Berichten der Reisenden fast täglich in heftigen Gewittern starke Regengüsse nieder. Wenn man nun bedenkt, ein wie großes Volumen das in großer Menge niederfallende Wasser als Wasserdampf in der Atmosphäre gehabt haben muß, so wird man einsehen, daß durch das Ausscheiden und die Condensirung dieser Wasserdämpfe eine bedeutende Verdünnung der Atmosphäre bewirkt wird. Ferner wird bei der Condensation eine nicht unbeträchtliche Wärmemenge frei (§. 312), welche eine weitere Verdünnung der Atmosphäre erzeugt. Die Luft muß demnach von allen Seiten hin in den Raum, in welchem die Verdünnung stattgefunden hat, eindringen. So erklären sich denn auch die in dieser Region beobachteten Stürme.

§. 353. **Fortsetzung; Moussons, veränderliche Winde in höheren Breiten.** Der indische Ocean liegt bekanntlich auch in der Region der Passatwinde, zeigt aber ein von dem atlantischen und stillen Meere etwas abweichendes Verhalten. In dem südlichen, südlich von dem Aequator liegenden Theile desselben finden wir das ganze Jahr hindurch den gewöhnlichen Passatwind, also Südostwind, herrschend. Anders verhält es sich in dem nördlichen Theil; hier finden wir nur von October bis April den Nordostpassat, dagegen von April bis October einen regelmäßig wehenden Südwestwind. Man hat den hier herrschenden Winden von dem Malayischen Wort Moussin (Jahreszeit) den Namen Monssons beigelegt, um dadurch ihre Abhängigkeit von den Jahreszeiten anzudeuten. Diese

Digitized by Google

Abweichung in dem indischen Ocean erklärt man sich durch die Lage desselben zu den zwei großen Continenten, Afrika und Asien. In unserem Winter nämlich ist die Temperatur des südlichen Afrika am größten, und diejenige des asiatischen Continents am kleinsten, ein Umstand, der offenbar eine Strömung nach dem südlichen Afrika hin, also eine nordöstliche, hervorrufen muß. Die Wärmeverhältnisse begünstigen und befördern also noch das regelmäßige Auftreten des Nordostpassats. Im Sommer dagegen sind die Wärmeverhältnisse beider Continente umgekehrt. Die jetzt stattfindende große Erwärmung des asiatischen Continents ruft demnach eine Strömung nach ihm hin, also eine südliche Strömung hervor, welche sich aber durch die gleichzeitige Arendrehung der Erde in eine südwestliche umsetzt.

Der von den Polen nach dem Aequator gerichtete Strom, aus welchem wir uns die Erscheinung der Passatwinde erklärten, und welchem man den Namen Polarstrom gegeben hat, war aber nur die nothwendige Folge von der Annahme, daß in der heißen Zone die Luft wegen ihrer größeren Wärme in die Höhe steige, und oben, um das Gleichgewicht der Atmosphäre wieder herzustellen, auf beiden Seiten nach den Polen hin wieder abfließe. Es fragt sich nun, ob diese Annahme nur eine hypothetische sei, oder ob in der That Erfahrungen für dieselbe sprechen. Es sind namentlich folgende Thatsachen, welche für die wirkliche Existenz dieses Aequatorealstromes, wie man ihn genannt hat, angeführt werden. Während auf der an dem östlichen Rande der Antillenkette liegenden Insel Barbados im Jahre 1812 der gewöhnliche Nordostpassat wehte, waren die Bewohner nicht wenig erstaunt, als auf ihre Insel vulcanische Asche herabfiel. Es stellte sich bald heraus, daß dieselbe von einem Vulcane zu ihnen gekommen sei, der auf der Insel St. Vincent, also westlich von Barbados liegt. Aehnlich wurde am 25. Februar 1835 bei einem Ausbruche des Vulcans Cosiguina im Staate Guatimala die Asche bis in die Höhe des oberen Stromes geschleudert, der sie in südwestlicher Richtung fortführte, so daß sie auf der Insel Jamaika niederfiel. Auf der Spitze des Pics auf Teneriffa herrschen westliche Winde vor, während doch auf dem benachbarten Meere gleichzeitig der Nordostpassat beobachtet wird. Paludan, ein mit den tropischen Meeren genau bekannter Seemann, berichtet, daß die Wölkchen in den höheren Schichten sich häufig gegen den Passat bewegen. Wenn hier von westlichen Winden die Rede ist, so darf das nicht auffallen, da ja die nach den Polen strömenden Lufttheilchen wegen der Arendrehung der Erde auch nicht die rein südliche und nördliche Richtung beibehalten können, sondern, weil sie jetzt wegen ihrer größeren Geschwindigkeit die voraneilenden sind, eine südwestliche Richtung auf der nördlichen, und eine nordwestliche auf der südlichen Halbkugel annehmen müssen. Die Luft des oberen Stromes kann aber ihre höhere Temperatur nicht beibehalten, sie kühlt sich nach und nach immer mehr ab, wird dichter, und senkt sich nieder, so daß in höheren Breiten der Aequatorealstrom wieder die Oberfläche der Erde erreicht, und dann sich neben dem Polarstrom, und nicht mehr über demselben, hinbewegt. Auch für diese Behauptung liefert die Erfahrung einen Beleg, denn obgleich bei uns ein gar häufiger Wechsel der Windrichtung stattfindet, so sind doch unbestritten die Südwest- und die Nordostwinde die

Digitized by Google

in hohem Grade vorherrschenden. Beide wehen jedoch nicht mit gleicher Häufigkeit, sondern der Südwestwind weit häufiger, als der Nordostwind. Es könnte demnach scheinen, als ob mehr Luft von dem Aequator nach den Polen, als von den Polen nach dem Aequator ströme. Dies würde aber auf die Dauer ganz unmöglich sein, da ja dann nach und nach alle Luft von dem Aequator sich entfernen würde. Die Sache findet aber ihre Erklärung eines Theils darin, daß die Luft des Aequatorealstromes eine höhere Temperatur besitzt, als diejenige des Polarstromes, und daß in Folge davon die erstere bei gleicher Quantität doch ein größeres Volumen besitzen muß, als die letztere, und anderen Theiles darin, daß die erstere noch eine große Menge Wasserdämpfe mit sich führt, wodurch ihr Volumen abermals vergrößert wird, während die letztere nur arm an Wasserdämpfen und verhältnißmäßig trocken ist. Mit Einschluß der Wasserdämpfe strömt auch in der That eine größere Gasmenge nach den Polen, als nach dem Aequator. Da, wo die beiden Ströme an einander grenzen, suchen sie sich gegenseitig zu verdrängen, und je nachdem dies dem einem mehr oder weniger in Beziehung auf den andern gelingt, wird er auch die Richtung des letzteren mehr oder weniger abzuändern im Stande sein, woraus sich dann der häufige Wechsel in der Windesrichtung bei uns erklärt. Trotzdem daß der Wechsel der Windesrichtungen bei dem ersten Anschein ganz regellos zu sein scheint, so hat doch Professor Dove in Berlin gezeigt, daß auf der nördlichen Halbkugel die Drehung vorzugsweise in der Richtung von Süd durch West nach Nord und Ost erfolgt. Haben wir also z. B. Westwind, so ist eine größere Wahrscheinlichkeit dafür vorhanden, daß wir bei einem Wechsel der Windesrichtung Nordwestwind bekommen werden, als Südwestwind. Auf der südlichen Halbkugel erfolgt die Drehung in der entgegengesetzten Richtung. Als eine weitere Bestätigung des Dove'schen Gesetzes kann auch die Erfahrung angeführt werden, daß bei uns die West- und Ostwinde häufiger wehen, als die Süd- und Nordwinde, ja sogar nach den Südwest- und Nordostwinden die bei uns am häufigsten vorkommenden Winde sind.

§. 354. **Feuchtigkeitsgehalt der Luft.** Wir haben bereits gesehen (§. 311), daß alle Flüssigkeiten an ihren Oberflächen bei jeder Temperatur verdunsten. Nun sind aber in der Natur die Oberflächen der großen Wasserbehälter (Meere, Ströme, Flüsse, Seeen) mit der atmosphärischen Luft in Berührung. Es muß sich demnach fortwährend eine nicht unbeträchtliche Menge Wasserdampf in die Luft erheben. Aus §. 33 wissen wir aber, daß, wenn man in einen und denselben Raum verschiedene Gase bringt, welche keine chemische Verbindung mit einander eingehen, jedes derselben sich stets gleichförmig durch den ganzen Raum verbreitet (Dalton'sches Gesetz). Dies Verhalten bleibt ungeändert, wenn, wie in unserem Falle, an die Stelle des einen Gases ein Dampf tritt. Wäre es anders, so müßte, da das specifische Gewicht des Wasserdampfes in einem damit gesättigten Raume stets nur ungefähr $\frac{5}{8}$ von demjenigen der Luft bei gleicher Temperatur und gleicher Spannkraft ist, der durch die Verdunstung gebildete Wasserdampf in der Atmosphäre in die Höhe steigen, und sich über der Luft lagern; es würde nach und nach alles Wasser durch Verdunstung von der Erdoberfläche verschwinden. Da nun die atmosphärische Luft in allen ihren Schichten Wasserdämpfe enthält, so ent-

Digitized by Google

steht zunächst die Aufgabe, das Verhalten der Wasserdämpfe in einem bereits mit Luft erfüllten Raume zu untersuchen. Es kann dies mit demselben in §. 314 beschriebenen Apparate geschehen, nur muß die Röhre, wenn sie mit Quecksilber gefüllt wird, nicht ganz voll gefüllt werden, so daß über dem Quecksilber noch etwas Luft stehen bleibt, welche, wenn die Röhre umgedreht wird, dann in den oberen Raum in die Höhe steigt. Bringt man dann wieder Wasser in kleinen Quantitäten in die Röhre, so bilden sich aus demselben jetzt die Wasserdämpfe in einem lufterfüllten Raume. Die Resultate solcher Untersuchungen haben ergeben, daß sich in einem lufterfüllten Raume ebenso viel Dampf bildet, und daß das jeder Temperatur entsprechende Maximum seiner Dichte und Spannkraft dasselbe ist, wie in dem leeren Raume. Der einzige Unterschied ist nur der, daß, während die Verdunstung im luftleeren Raume momentan erfolgt, und der Raum sich sogleich mit Dämpfen sättigt, sobald wir Wasser in denselben hineintreten lassen, immer einige Zeit erforderlich ist, wenn ein mit Luft erfüllter Raum gesättigt werden soll. Diese Zeit ist desto länger, je größer der Druck ist, welchen die Luft ausübt. Die Luft stellt also der Verbreitung der Dämpfe einen mechanischen Widerstand entgegen. Man erklärt sich denselben durch die Annahme, der Dampf dringe in die Poren der Luft ein, und fülle sie so lange an, bis sie gesättigt sind; da diese Poren klein sind, so verfließe einige Zeit, ehe er durch dieselben hindurch dringen könne, und so werde der Raum erst später mit Dämpfen gesättigt.

Eine weitere Aufgabe für die Physiker ist die, zu jeder Zeit die Menge der in der Atmosphäre vorhandenen Wasserdämpfe bestimmen zu können. Man unterscheidet aber eine *absolute* und eine *relative Feuchtigkeit*. Unter der ersteren versteht man die wirkliche, in der Luft vorhandene Menge der Wasserdämpfe, unter der relativen dagegen das Verhältniß der in einem Raume vorhandenen Dampfmenge zu derjenigen, welche dieser Raum in sich aufnehmen könnte, wenn er bei der stattfindenden Temperatur mit Dämpfen gesättigt wäre. Es kann demnach zu einer Zeit die absolute Feuchtigkeit größer sein, als zu einer anderen, während doch grade in der ersteren Zeit die relative kleiner ist, als in der letzteren. Wenn man z. B. die Bestimmung bei sehr verschiedenen Temperaturen macht, so kann bei einer hohen Temperatur in einem Cubikfuß Luft mehr Wasserdampf vorhanden sein, als bei einer niedrigen Temperatur, und doch kann die warme Luft noch weit von dem Sättigungspunkte entfernt sein, während die kalte Luft demselben vielleicht sehr nahe ist, da ein Raum desto weniger Dämpfe in sich aufnehmen kann, eine je niedrigere Temperatur er hat, wie aus §. 314 hervorgeht. Zur Bestimmung sowohl der absoluten, als auch der relativen Feuchtigkeit benutzt man die *hygroscopischen* Substanzen (ὑγρός naß, feucht; σκοπεῖν spähen, untersuchen). Man nennt so solche Körper, welche das Bestreben haben, den in der Luft enthaltenen Wasserdampf zu condensiren. Dahin gehört vor Allen das Chlorcalcium, aber auch Haare, Fischbein, Federkiele, Darmsaiten u. s. w. Soll nun die absolute Feuchtigkeit gefunden werden, so kann dies dadurch geschehen, daß man ein bestimmtes Volumen Luft durch ein mit hygroscopischen Substanzen, z. B. mit Chlorcalcium, gefülltes Rohr streichen läßt. Wird die Röhre vor dem Versuche und nach dem Versuche genau abgewogen, so zeigt der Unterschied beider Gewichte das Gewicht

Digitized by Google

des in der Luft enthalten gewesenen Wasserdampfes an. Die Bestimmung der absoluten Feuchtigkeit ist jedoch nur von geringem Interesse, wir wünschen vielmehr die relative Feuchtigkeit zu kennen, um daraus auf die Möglichkeit und Wahrscheinlichkeit eines bald erfolgenden Niederschlags schließen zu können. Man hat daher zu diesem Zwecke verschiedene Instrumente construirt, denen man den Namen Hygrometer (ὑγρός naß, feucht; μέτρον Maß) beigelegt hat. Von den auf hygroscopische Substanzen sich gründenden Hygrometern sind die bekanntesten das Fischbeinhygrometer von Deluc und das Haarhygrometer von Sauſſure. Die Construction beider ist so übereinstimmend, daß die Beschreibung eines derselben vollständig genügt. In dem Fischbeinhygrometer ist ein dünner Streifen quer über die Fasern geschnittenen Fischbeins an dem einen Ende fest eingeklemmt, an dem anderen Ende ist ein feiner Faden befestigt, der über eine Rolle geht, und dessen anderes Ende durch eine Spiralfeder gespannt gehalten wird. An der Are der Rolle ist ein Zeiger befestigt, der bei der Drehung der Are sich an einem eingetheilten Kreise vorbeibewegt. Je nachdem nun der Fischbeinstreifen aus der Luft mehr oder weniger Feuchtigkeit anzieht, wird er länger oder kürzer, und stößt dadurch entweder den über die Rolle geschlagenen Faden von sich weg, oder zieht ihn nach sich hin, wodurch die Bewegung der Rolle und des damit verbundenen Zeigers bewirkt wird. Die Eintheilung des Kreises wird dadurch erhalten, daß man das Instrument in einen Raum bringt, dem durch ausgeglühtes Chlorcalcium alle Wasserdämpfe entzogen sind. Den Punkt, nach welchem der Zeiger weist, nachdem er zur Ruhe gekommen, bemerkt man, und bezeichnet ihn mit Null. Darauf bringt man das Instrument in einen ganz mit Wasserdämpfen gesättigten Raum, bemerkt abermals die Stelle, an welcher der Zeiger zur Ruhe kommt, und bezeichnet sie mit 100. Den Bogen zwischen beiden markirten Punkten theilt man dann in 100 gleiche Theile. Diese Instrumente haben gar keinen wissenschaftlichen Werth, ihre Anzeigen geben nicht die Größe der relativen Feuchtigkeit an, und stehen mit derselben in keinem erkennbaren Zusammenhang. Man kann dieselben höchstens dazu benutzen, um im Allgemeinen zu sehen, ob die Atmosphäre zu einer Zeit dem Zustande der Sättigung näher ist, als zu einer anderen. Außerdem sind die Angaben zweier Instrumente, selbst wenn sie auf dieselbe hygroscopische Substanz basirt sind, nach der beschriebenen Anfertigung solcher Instrumente gar nicht mit einander vergleichbar, ja sogar die Angaben eines und desselben Instrumentes bleiben sich nach der Erfahrung nicht einmal immer constant. Diese Hygrometer kommen daher jetzt auch immer mehr außer Gebrauch, seitdem man zwei andere Instrumente von viel höherem wissenschaftlichen Werthe hat kennen gelernt. Es sind dies das Hygrometer von Daniell und das Psychrometer von August (ψυχρός naßkalt, μέτρον Maß), deren Einrichtung und Gebrauch jetzt noch näher erläutert werden soll. Daniell's Hygrometer besteht aus einer zweimal rechtwinklig umgebogenen Glasröhre, die an beiden Enden in Glaskugeln endigt. Die Luft wird bei der Anfertigung ausgetrieben, die eine Kugel halb mit Schwefeläther gefüllt, und in dieselbe die Kugel eines Thermometers eingelassen, dessen Röhre und Scale in die Röhre des Apparates hineinragt. Diese Kugel ist außen vergoldet, und gut polirt, die andere mit feiner Leinwand oder Mousselin umwickelt. An dem Fuße

Digitized by Google

des Stativs, auf welchem der Apparat befestigt ist, ist noch ein anderes Thermometer angebracht. Soll eine Beobachtung gemacht werden, so betröpfelt man die mit Leinwand umwickelte Kugel mit Schwefeläther, und wartet ab, bis sich die vergoldete Kugel beschlägt. In diesem Momente wird sowohl das innere, als auch das äußere Thermometer abgelesen, und die Beobachtung ist beendigt. Wie aus einer solchen Beobachtung die relative Feuchtigkeit gefunden wird, wird aus Folgendem klar werden. Die Röhre und die mit Leinwand umwickelte Kugel des Apparates sind mit Schwefeläther dämpfen angefüllt. Wird nun auf die Leinwand Schwefeläther gegossen, so verdunstet derselbe, und kühlt dadurch die Kugel, sowie die in derselben befindlichen Dämpfe ab, so daß die letzteren condensirt werden. Da sich demnach ein relativ leerer Raum bildet, so verdunstet jetzt Schwefeläther in der vergoldeten Kugel, wodurch auch diese Kugel, und mit ihr die sie umgebende Luft immer mehr abgekühlt wird. Sobald diese Luft bis zu einer Temperatur abgekühlt ist, für welche sie mit Dämpfen gesättigt ist, wird sich ein Theil der in ihr enthaltenen Dämpfe an der vergoldeten Kugel niederschlagen, die eben deßwegen vergoldet und wohl polirt sein muß, um den leisesten Beschlag sogleich beobachten zu können. Wir lernen also aus einer Beobachtung mit Daniell's Hygrometer, bei welcher Temperatur die Luft bei der vorhandenen Dampfmenge gesättigt sein würde (man nennt diese Temperatur den Thaupunkt), während das Thermometer an dem Fuße des Stativs die grade stattfindende Lufttemperatur angibt. Nun hat man Tabellen, in welchen für jede Temperatur angegeben ist, wieviel Dämpfe ein Cubikfuß Luft enthalten muß, um für diese Temperatur gesättigt zu sein. Es wird also in diesen nachgesehen, wieviel Dämpfe die Luft bei der stattfindenden Temperatur enthalten könnte, es seien a; und bei der Temperatur des Thaupunktes findet man, wieviel sie wirklich enthält, dies seien b. Der Bruch $\frac{b}{a}$ zeigt also an, den wievielten Theil der Dämpfe, welche die Luft bei der stattfindenden Temperatur enthalten könnte, wirklich enthält, d. h. er gibt die relative Feuchtigkeit an.

August's Psychrometer besteht aus zwei an demselben Stativ befestigten und ganz genau in ihrem Gang übereinstimmenden Thermometern. Die Kugel des einen ist mit feiner Leinwand umwickelt, die mit ihrem Ende in ein unter der Kugel befindliches kleines Gefäß mit Wasser eintaucht. Man stellt das Instrument im Freien auf, und wenn man eine Beobachtung machen will, hat man Nichts zu thun, als nur den Stand der beiden Thermometer abzulesen. Das Wasser in dem kleinen Gefäß zieht sich nämlich capillarisch in der Leinwand in die Höhe, und verdunstet auf der Kugel, die sich dadu ch abkühlt, so daß das Thermometer sinkt. Dadurch erhält die die Kugel umgebende Luft immer mehr Wasserdämpfe. Nun aber verdunstet Wasser nur so lange, bis die mit der Oberfläche desselben in Berührung stehende Luft mit Dämpfen gesättigt ist. Sobald also dieser Zeitpunkt bei der die Kugel umgebenden Luft eingetreten ist, kann das Wasser auf der Leinwand nicht weiter verdunsten, und dadurch fällt auch der Grund für ein weiteres Fallen des Thermometers weg. Die Temperatur, die es zeigt, wenn es einen stationären Stand eingenommen hat,

Digitized by Google

ist offenbar wieder der Thaupunkt, während das andere Thermometer die Lufttemperatur angibt. Daß nun auf dieselbe Weise, wie bei dem Daniell'schen Hygrometer mit Hilfe der Tabellen die relative Feuchtigkeit gefunden wird, braucht wohl nicht erst bemerkt zu werden.

Die bis jetzt durch Hygrometerbeobachtungen gewonnenen Resultate in Beziehung auf den Feuchtigkeitsgehalt der Luft sind folgende. Während eines Tages ist in der Regel die Luft einige Zeit nach dem Aufgange der Sonne am feuchtesten, wird dann von da an bis etwa eine Stunde, nachdem die größte Tageswärme eingetreten ist, immer trockner, worauf aber bis zu dem folgenden Morgen die Feuchtigkeit wieder zunimmt. Nicht so ist es mit der absoluten Feuchtigkeit, denn diese ist am Tage größer, als am Morgen und in der Nacht. Was nun die jährlichen Veränderungen betrifft, so steigt die absolute Dampfmenge in demselben Verhältniß, in welchem die Temperatur größer wird, sie ist im Januar am kleinsten, und im Juli am größten. Anders dagegen ist auch hier der Gang der relativen Feuchtigkeit, den Kämtz folgendermaßen beschreibt: „Wenn die Wärme nach der Mitte des Januars zu steigen anfängt, dann verdunstet zwar sogleich eine größere Menge von Wasser, aber da sich die Dämpfe nur langsam durch die Atmosphäre verbreiten, so nimmt die Dampfmenge nicht so schnell zu, als man nach der Aenderung der Temperatur erwarten sollte, die Atmosphäre wird relativ trockner. Es zeigt sich dieser Umstand besonders im April und Mai, wo die Wärme am geschwindesten steigt. Wenn sich später das Thermometer weniger ändert, dann nimmt die Dampfmenge etwas schneller zu, als die Wärme, und die Luft kommt dem Zustande der Sättigung näher; dieses wird um desto auffallender, je mehr die Temperatur im Herbste sinkt." Ferner ist es wahrscheinlich, daß die relative sowohl, als die absolute Feuchtigkeit immer mehr abnimmt, je weiter wir uns von der Küste in das Innere der Continente begeben, da ja offenbar bei gleicher Temperatur sich in wasserreichen Gegenden mehr Dämpfe bilden können, als in wasserarmen.

§. 355. **Nebel, Wolken.** Wenn Wasser in einem offenen Gefäße siedet, so sehen wir aus dem Gefäße eine weißlich aussehende Masse sich erheben, die wir Schwaden nennen, die aber auch sehr häufig von den Leuten Dampf genannt wird. Daß es kein wirklicher Wasserdampf sein kann, geht schon daraus hervor, daß der Wasserdampf vollkommen durchsichtig, und deßwegen unsichtbar ist. Allerdings wird durch das Sieden wirklicher Wasserdampf gebildet, der sich in die darüber stehende Luft erhebt. Dadurch aber und wegen ihrer geringeren Temperatur wird diese Luft bald mit Wasserdämpfen gesättigt, so daß die nun noch weiter aufsteigenden Dämpfe die Dampfgestalt nicht beibehalten können, sondern condensirt werden. Diese condensirten Dämpfe sind es, welche den Schwaden bilden. Bei angestellten mikroscopischen Untersuchungen fand man, daß derselbe aus lauter kleinen Wasserkügelchen besteht. Da die Kügelchen aber nicht das sternartige Funkeln zeigen, welches massive Wasserkügelchen bei starkem auffallendem Lichte dem Auge darzubieten pflegen, sondern die mattere Reflexion wie von einem dünnen Häutchen, so schloß man daraus, daß die Kügelchen hohl, und mit Luft gefüllt sein müßten, so daß sie recht wohl mit den Seifenblasen verglichen werden können, von welchen sie sich nur durch die Größe unterscheiden. Deßhalb hat man auch diesen Kügel-

Digitized by Google

chen condenſirten Dampfes den Namen **Dunſtbläschen** beigelegt. Einen ſolchen Schwaden ſieht man auch ſich über den heißen Quellen und aus den Schornſteinen der Locomotiven erheben, und die Erfahrung lehrt, daß die heißen Quellen bei feuchtem Wetter weit mehr dampfen, als bei trocknem, und daß der Schwaden der Locomotiven bei feuchtem Wetter lange als weiße Säule in der Luft ſchweben bleibt, während er bei trockenem Wetter ſehr raſch wieder verſchwindet, d. h. der condenſirte Dampf abermals Dampfgeſtalt annimmt. Es ſind dies Beſtätigungen aus der Erfahrung für die nach der Theorie gemachte Annahme, daß der Schwaden ſich nur in einer bereits mit Dämpfen geſättigten Luft bilden könne. Der **Nebel** iſt nun Nichts Anderes, als die Erſcheinung des Schwadens im Großen. Er wird beobachtet bei windſtillem Wetter über ſtehenden Waſſermaſſen, im Winter über offenem Waſſer, am Morgen namentlich im Frühjahre und Herbſt, wo man feuchte Stellen ſchon von Ferne an den darüber ruhenden Nebelmaſſen erkennen kann, Morgens über Flüſſen. In allen dieſen Fällen zeigt ſich ſtets die Temperatur der Oberfläche, ſei es diejenige des Waſſers oder des Landes, höher, als die der darüber befindlichen Luft. Sobald ſich hier die aufſteigenden, wärmeren, feuchten Luftmaſſen mit den kälteren, darüber ruhenden miſchen, und dadurch die Temperatur der erſteren bis über den Thaupunkt erniedrigt wird, müſſen ſich natürlich die in der wärmeren Luft enthaltenen Dämpfe condenſiren, und dadurch die Entſtehung des Nebels hervorrufen. Wenn ſich auch die meiſten der beobachteten Nebel auf dieſe Art erklären laſſen, ſo iſt dies doch nicht mit allen der Fall. Denn bekanntermaßen entſtehen bisweilen im Winter auch ſehr dicke Nebel, wenn die Luft längere Zeit ſehr kalt geweſen war, und nun plötzlich ein Südweſtwind ſich einſtellt. Dieſe Nebel erklären ſich durch den grade umgekehrten Proceß. Hier bringt der Südweſtwind die wärmere Luft, aber auch die Feuchtigkeit mit. Durch das Einſtrömen in die kältere Luft wird die Temperatur des Südweſtwindes erniedrigt. Iſt dieſe Erniedrigung ſo groß, daß die Temperatur bis unter den Thaupunkt fällt, ſo werden die von dem Südweſtwinde mitgeführten Waſſerdämpfe condenſirt, und bilden den Nebel.

Von dem Nebel nur durch größere Entfernung von der Erdoberfläche verſchieden ſind die **Wolken**. So ſehr dieſe Behauptung beim erſten Schein wegen des äußerſt verſchiedenen Ausſehens beider befremden mag, ſo findet ſie doch in der Erfahrung ſelbſt ihre Beſtätigung. Denn ſchon oft ſah man die Gipfel der Berge in Wolken eingehüllt, während ſich zur ſelben Zeit die Wanderer auf dieſen Bergſpitzen mitten im Nebel befanden. Wenn aber die Wolken wirklich aus Dunſtbläschen beſtehen, d. h. aus Kugelhüllen von tropfbar flüſſigem Waſſer, die mit Luft gefüllt ſind, ſo fragt es ſich, warum ſie in der Luft ſchweben bleiben, und nicht zur Erde niederſinken, da doch offenbar jedes ſolches Dunſtbläschen für ſich mehr wiegen muß, als die von ihm aus der Stelle vertriebene Luft. Wir wiſſen aber, daß ein Körper, je größer ſeine Oberfläche im Verhältniß zu ſeinem Gewichte iſt, bei ſeiner Bewegung durch die Luft einen um ſo bedeutenderen Widerſtand findet. Daraus würde ſich nur höchſtens ein ſehr langſames Fallen erklären laſſen, aber ein Fallen müßte denn doch immer noch ſtattfinden. Nun nimmt aber die Temperatur der Luft von der Oberfläche der Erde an nach der Höhe immer mehr ab, die fallenden Dunſt-

Digitized by Google

bläschen kommen demnach bei dem Fallen in eine wärmere Luft, die grade deßwegen auch mehr Wasserdämpfe in sich aufnehmen kann, ehe sie gesättigt ist. In einer solchen Luft müssen die Dunstbläschen wieder Dampfgestalt annehmen. Dieser Verlust der Wolke wird aber stets wieder dadurch ersetzt, daß sich in der oberen gesättigten Luft dann neue Dunstbläschen bilden. Dadurch scheint es allerdings für uns, als ob die Wolke unbeweglich in der Luft schwebe. Daß aber die Wolken, wenn sie in eine Luftströmung hineingerathen, von dieser mit fortgeführt werden, sei es in horizontaler, sei es in verticaler Richtung, kann nicht befremden.

Das äußere Ansehen der Wolken ist oft nach Farbe und Gestalt sehr verschieden. Die Farbe derselben wechselt von dem dunkelsten, fast schwarzen Grau bis zu Weiß. Diese Verschiedenheit rührt nur von der größeren oder geringeren Dichte der Wolken her. Sehr dichte Wolken absorbiren das Licht völlig, und erscheinen daher dunkel, dünnere lassen es zum Theil durch, und zerstreuen es zum Theil, sind daher mehr oder weniger weiß. In Beziehung auf die Gestalt unterscheidet man mit dem Engländer Howard drei Hauptformen, die Federwolke (cirrus), die Haufenwolke (cumulus) und die Schichtwolke (stratus). Die Federwolke besteht aus sehr zarten, bald mehr streifigen, bald mehr lockigen oder federartigen Fasern, welche nach schönem Wetter zuerst am Himmel erscheinen. Die Fäden der Wolken sind entweder scharf begrenzt oder verwaschen. Im ersteren Falle dauert nach der Erfahrung das trockene Wetter noch einige Tage fort. Ihre geringe Ausdehnung und ihre oft scheinbare Ruhe erklären sich hinlänglich dadurch, daß nach den angestellten Messungen die Höhe derselben über der Erdoberfläche sehr groß ist. Die Haufenwolke zeichnet sich durch ihre halbkugelförmige Gestalt mit horizontaler Grundfläche aus. Manchmal thürmen sich Haufenwolken über einander, und bieten dann gewissermaßen den Anblick ferner Gebirge. Die Schichtwolken sind horizontale Wolkenstreifen von im Verhältniß zu ihrer Länge geringer Breite. Wahrscheinlich zeigen sie sich lang und schmal, weil sie gegen uns schief stehen, und demnach nach ihrer Breite gesehen verjüngt erscheinen. Ueberzieht sich der ganze Horizont mit einem gleichförmigen Gewölk von schwarzgrauer Farbe, so nennt man ein solches Gewölk Regenwolke (nimbus). Die drei erst genannten Formen sind jedoch selten scharf von einander abgegrenzt, sondern gehen in einander über, und darnach unterscheidet man noch die fedrige Haufenwolke (cirro-cumulus), die fedrige Schichtwolke (cirro-stratus) und die geschichtete Haufenwolke (cumulo-stratus). Die fedrigen Haufenwolken sind das unter dem Namen Schäfchen allgemein bekannte Gewölk. Auch sie befinden sich in bedeutender Höhe, wie schon daraus hervorgeht, daß sie auf den höchsten Bergen noch grade so gesehen werden, wie in der Ebene.

§. 356. **Regen.** Wenn sich die Temperatur einer Wolke fortwährend vermindert, so werden immer mehr Dämpfe condensirt. Dadurch wird die Dicke der Hülle der Dunstbläschen größer, die einzelnen Bläschen kommen einander näher, fließen endlich zusammen, und vereinigen sich zu Wassertropfen. Dasselbe kann auch dadurch bewirkt werden, daß Luftströme die einzelnen Bläschen zu einander hintreiben. Die so gebildeten Wassertropfen sind nicht mehr hohl, ihr Gewicht ist also jetzt im Verhältniß zu ihrem Volumen groß genug, um den Widerstand der Luft überwältigen zu kön-

Digitized by Google

nen, sie fallen als Regen nieder. In der Höhe sind die Regentropfen noch sehr klein, vergrößern sich aber immer mehr während ihres Fallens, namentlich wenn auch die unteren Luftschichten ihrem Sättigungspunkte ziemlich nahe sind, indem dann wegen der geringeren Temperatur, die sie von den oberen Schichten mitbringen, sich immer neue Dämpfe auf ihnen niederschlagen. So finden wir nach den zu Paris angestellten Beobachtungen, daß die jährliche Regenmenge, welche im Hofe des Observatoriums niederfällt, zu derjenigen, welche auf der 28 Meter höher liegenden Terrasse niederfällt, im Mittel sich wie 57 zu 50 verhält. Die an einem Orte niederfallende Regenmenge bestimmt man aber durch die Höhe, bis zu welcher der Regen die Erdoberfläche an diesem Orte bedecken würde, wenn Nichts verdunstete und Nichts in die Erde eindränge. Zu solchen Bestimmungen hat man eigene Instrumente construirt, die den Namen Regenmesser, Hyetometer (ὑετός Regen, μέτρον Maß), Ombrometer (ὄμβρος Regen) oder Pluviometer (pluvia sc. aqua, Regen) führen.

Das vollkommenste derselben ist das von Horner angegebene. Es ist dies eine kupferne Urne mit kreisförmiger Oeffnung, die sich nach Unten in eine trichterförmige Röhre verengert. Unter der trichterförmigen Röhre befindet sich ein lackirtes kupfernes Schiffchen, das durch eine feste Scheidewand in der Mitte in zwei gleiche Behälter abgetheilt ist. Das Schiffchen ruht unterhalb des Schwerpunktes auf einer Are, und kann daher wegen der bedeutenden Oberlast nie in horizontaler Stellung sich befinden, sondern muß immer nach einer oder der andern Seite umschlagen, doch so, daß die sich in der Höhe befindende Abtheilung des Schiffchens immer grade unter die Oeffnung des Trichters zu stehen kommt. Unter den beiden Abtheilungen des Schiffchens befinden sich noch zwei lackirte, kupferne Trichter. Der auf die Oberfläche der Urne, die im Freien aufgestellt wird, fallende Regen fließt nun durch die Urne und die untere trichterförmige Röhre derselben in die unter der letzteren sich grade befindende Abtheilung des Schiffchens, und zwar so lange, bis diese Abtheilung genau mit einem Cubikzoll Wasser angefüllt ist. In demselben Augenblick schlägt das Schiffchen um, und die andere leere Abtheilung desselben kommt unter die Oeffnung, während die gefüllte Abtheilung sich durch den darunter befindlichen Trichter ausleert. Sobald auch diese zweite Abtheilung ebenfalls mit einem Cubikzoll Wasser angefüllt ist, schlägt das Schiffchen abermals um, und so geht das Spiel fort. Die Bewegung des Schiffchens wird durch einen Mechanismus auch einem Zeiger mitgetheilt, so daß dieser bei jedem Umschlage des Schiffchens auf einem Zifferblatte um einen Theilstrich weiter fortrückt, und man auf dem Zifferblatte immer ablesen kann, wie viele Cubikzoll Regen auf die Oberfläche der Urne von einer Beobachtung bis zur nächsten gefallen sind.

Durch Beobachtungen mit solchen Regenmessern hat man gefunden, daß in unseren Gegenden im Durchschnitte jährlich ungefähr so viel Regen herabfällt, daß er die Oberfläche der Erde unter den oben angegebenen Bedingungen ungefähr 2 Par. Fuß hoch bedecken würde. Dies ist jedoch keineswegs überall auf der Erde so, sondern die jährliche Regenmenge ist in der heißen Zone viel bedeutender, als in höheren geographischen Breiten. Ueberhaupt ist auch dort die Vertheilung des Regens auf die verschiedenen Zeiten ganz anders, wie bei uns. Von der Region der Calmen

Digitized by Google

ist bereits bemerkt, daß in derselben Windstillen mit heftigen, von Gewittern begleiteten Stürmen abwechseln. Bei diesen fast täglich sich wiederholenden Gewittern fällt immer eine große Menge Regen herab. Der aufsteigende Luftstrom nimmt nämlich eine bedeutende Quantität von Dämpfen mit, welche in den höheren Schichten der Atmosphäre, und an der Grenze des oberen und unteren Passats condensirt werden. Die Sonne geht hier meistens bei heiterem Himmel auf, gegen Mittag zeigen sich einzelne Wolken, deren Volumen bald zunimmt, es folgen starke Gewitter mit heftigen Windstößen, gegen Abend lösen sich die Wolken auf, und die Sonne geht meistens wieder heiter unter. In den Regionen der Passate müssen wir einen Unterschied zwischen dem Meere und dem Festlande machen, da ja nur auf dem Meere die Passate mit der größten Regelmäßigkeit wehen, während sie auf dem Festlande durch andere Ursachen vielfach modificirt werden. Auf dem Meere nun regnet es in diesen Regionen nicht, der Himmel ist stets heiter, namentlich so lange die Sonne auf der entgegengesetzten Halbkugel steht. An dieser Trockenheit scheinen eben die reichlichen Niederschläge in der Region der Calmen die Schuld zu tragen, da die Luft durch dieselben bereits einen großen Theil ihres Dampfgehaltes verloren hat. Anders ist es auf dem Festlande. Da unterscheidet man eine *trockene* und eine *nasse Jahreszeit*. Es regnet nämlich in dem einen Theile des Jahres, während der Himmel in dem anderen Theile heiter ist, so daß selbst das Erscheinen einer einzelnen Wolke zu den Seltenheiten gehört. Die nasse Jahreszeit entspricht nach dem Stande der Sonne der Zeit des Sommers, die trockene derjenigen des Winters. In den gemäßigten Zonen endlich vertheilt sich die herabfallende Regenmenge auf das ganze Jahr, so daß in dem mittleren Europa in einem Jahre im Durchschnitt etwa 146 Regentage gezählt werden. Diese Anzahl ist jedoch nach der Lage eines Ortes verschieden. Sie nimmt desto mehr ab, je weiter man sich von Westen nach Osten entfernt. In England ist sie z. B. etwa 160, in Deutschland gegen 150, sinkt aber in Ofen bereits auf 110 und in Kasan auf 90 herab. Berücksichtigt man die Vertheilung der Regenmenge auf die verschiedenen Jahreszeiten, so kann man Europa in 2 Regionen theilen, in die *Region der Sommer-* und in die *Region der Herbstregen* (Sommer und Herbst werden dabei nicht nach dem Kalender gerechnet, sondern mehr dem Gange der Temperatur gemäß abgetheilt, indem man den Sommer aus Juli, August und September, den Herbst dagegen aus den 3 folgenden Monaten bestehen läßt). Es hat sich nämlich herausgestellt, daß das ganze nordöstliche Europa zu der Region der Sommerregen, also zu derjenigen Region, in welcher im Sommer die Regenmenge größer, als im Herbste, ist, und daß das ganze südöstliche Europa zu der Region der Herbstregen gezählt werden muß. Deutschland kommt bei dieser Eintheilung zu der ersteren Region.

§. 357. **Schnee, Graupeln, Hagel.** Werden die Dämpfe in einer Region der Atmosphäre condensirt, deren Temperatur unter dem Gefrierpunkte liegt, so werden sie nicht zu tropfbar flüssigem, sondern zu festem Wasser, zu Eis. Ebenso muß das Wasser der bereits gebildeten Dunstbläschen der Wolke, wenn dieselben bis unter den Gefrierpunkt abgekühlt worden, erstarren. Es bildet sich der *Schnee*, der dann zur Erde niederfällt. Gelangt er bei seinem Fallen in Luftschichten, die verhältnißmäßig

Digitized by Google

warm sind, so schmilzt er wieder zu tropfbar flüssigem Wasser, ehe er die Erdoberfläche erreicht, woraus sich die Erfahrung erklärt, daß es oft im Thale regnet, während es gleichzeitig auf den benachbarten hohen Bergen schneit. Doch muß man sich vor dem Irrthume hüten zu glauben, daß der Schnee immer schmelzen müsse, so oft er in eine Luftregion gelange, deren Temperatur über 0° liege. Denn die Erfahrung lehrt, daß gar häufig bei uns Schnee fällt, während die Lufttemperatur noch einige Grade über dem Gefrierpunkt liegt. Wir müssen deßhalb annehmen, daß der Schnee in diesen niederen, wärmeren Schichten der Atmosphäre nicht lange genug verweilt, um zu schmelzen. Wenn bei kälterem Wetter der Schnee nicht sehr dicht fällt, und man fängt einzelne Flöckchen auf, so wird man finden, daß die meisten die Gestalt sechseckiger Sterne zeigen, indem von einem gemeinschaftlichen Mittelpunkt 6 Eisnadeln ausgehen, von welchen jede mit der folgenden einen Winkel von 60° bildet. Der Schnee ist also krystallisirtes Wasser, und gehört nach der eben beschriebenen Form der Flöckchen in das heragonale Krystallsystem (§. 17). Das Wasser scheint überhaupt nur im Wege der Krystallisation fest zu werden, denn wenn man auch im Eise unter den gewöhnlichen Umständen keine Krystallgestalt entdecken kann, so zeigen doch die optischen Eigenschaften desselben, die Farbenringe, die eine Eisplatte in der Turmalinzange zeigt (§. 282), daß es ein krystallisirter Körper ist. Wenn ein dichter Schnee in dicken Flocken herabfällt, so läßt sich an diesen zwar keine so regelmäßige Gestalt nachweisen, aber man wird sich doch bald überzeugen, daß solche Flocken nur ein Conglomerat einzelner Krystalle sind, da man an denselben doch ein Gewebe aus feinen Eisnadeln erkennt.

Im Frühjahr, besonders im März und April, fallen statt des Schneees oft die Graupeln nieder. Es sind dies rundliche, undurchsichtige Eiskörner, die aus ziemlich fest zusammengeballten Eisnädelchen bestehen, und die man leicht als zusammengesinterte Schneeflocken erkennt. Ueber die Bedingung ihres Entstehens hat Muncke folgende Ansicht aufgestellt. Zu Anfang des Frühlings hat der Erdboden oft noch die Winterkälte, wird aber durch die Strahlen der höher steigenden Sonne bedeutend erwärmt, so daß eine nicht unbeträchtliche Menge Wasserdampf in die höheren Regionen aufsteigt, wo noch im Ganzen die kalten Luftströmungen des Winters herrschen. Die mit Wasserdampf gesättigten Luftschichten, welche dann in die Höhe steigen, werden wegen der schlechteren Leitungsfähigkeit der Luft nicht eher abgekühlt, als bis sie durch einen Windstoß, das Eindringen der umgebenden, kälteren Luftschichten in ihre Masse, oder eine sonstige Ursache mit den kälteren Luftschichten gemengt sind. In dem Augenblicke, in welchem dieses geschieht, erfolgt eine Vereinigung des Wasserdampfes zu Regentropfen oder zusammenballenden Schneeflocken, welche in der kalten umgebenden Luft zusammensintern, und je nach dem quantitativen Verhältniß und der niederen Temperatur der beigemischten kalten Luft wird aller Wasserdunst in Graupeln und Schnee, oder Graupeln allein, oder Graupeln mit nachfolgendem Regen verwandelt.

Mit den Graupeln verwandt sind die oft Verderben bringenden Hagelkörner, welche bisweilen im Sommer während eines Gewitters herabfallen oder doch in Zeiten, in welchen die Luftelectricität einen hohen Grad von Stärke hat. Die Hagelkörner, welche in manchen Gegenden auch Schlossen genannt

Digitized by Google

werden, haben gewöhnlich eine birnförmige Gestalt, eine Spitze oben und ein halbkreisförmiges Segment an der gegenüberstehenden Seite, doch hat man sie auch in abgeplatteten und eckigen Formen beobachtet. In der Mitte befindet sich in der Regel ein undurchsichtiger, den Graupeln ähnlicher Kern, der von einer durchsichtigen Eismasse umgeben ist. Die Größe der Hagelkörner ist sehr verschieden. Wenn wir auch von den fabelhaften Berichten absehen, nach welchen schon Eismassen von 3 Fuß Länge, 3 Fuß Breite und 2 Fuß Höhe, ja solche von der Größe eines Elephanten aus der Atmosphäre herabgefallen sein sollen, so kann doch nicht geleugnet werden, daß Hagelkörner von der Größe eines Tauben-, ja selbst eines Hühnereies, und einem dieser Größe entsprechenden Gewichte von ½ bis 1 Pfund beobachtet worden sind. Die Hagelwetter zeigen sich meistens am Tage, sind in der heißen Zone selten, und werden am häufigsten zwischen dem 40 und 55sten Breitegrade beobachtet. Sie erstrecken sich meistens nur über einen verhältnißmäßig kleinen Raum, der mehr lang, als breit ist, und also die Gestalt eines Streifens hat. Sie halten auch gewöhnlich nicht lange an, doch fällt oft in der kurzen Zeit eine solche Menge Hagelkörner nieder, daß der Boden mehrere Zoll hoch bedeckt wird. Wenn ein Hagelwetter sich dem Zenith nähert, so hört man meistens ein starkes Geräusch in der Luft, das theils durch die auf einander treffenden Hagelkörner, theils durch die heftigen Luftströme, welche fast bei allen Hagelschauern eintreten, und die Wolken mit großer Schnelligkeit nach verschiedenen Richtungen treiben, erzeugt werden mag. Die Hagelwolken scheinen sehr niedrig zu schweben, eine große Dicke zu haben, und unterscheiden sich von andern Gewitterwolken durch einen sehr merkwürdigen aschgrauen Farbenton. Was nun endlich die Erklärung dieses Phänomens betrifft, so kann diese durchaus noch nicht als eine gelöste Aufgabe betrachtet werden. Die bekanntesten Erklärungsversuche sind die von Volta und L. v. Buch aufgestellten. Volta nimmt an, daß, wenn die Sonne die obere Fläche einer dichten Wolke beschiene, diese die Sonnenwärme größtentheils absorbire, durch die Erwärmung die Dunstbläschen wieder Dampfgestalt annehmen, in die Höhe steigen, aber dabei in kältere Luftschichten gelangen, wo sie wieder condensirt werden, und eine neue Wolkenschicht bilden. Die beiden Wolkenschichten treten sogleich in einen electrischen Gegensatz. Die aufsteigenden Dämpfe nämlich nehmen der unteren Wolke ihre Electricität, und es erhält dadurch die obere Wolke + E, die untere — E. Durch die Verdunstung werde aber so viel Wärme gebunden, daß die tiefer liegenden Dunstbläschen der unteren Wolke gefrieren. Die auf diese Weise entstandenen Eiskörner bewegen sich dann wie bei dem electrischen Puppentanz zwischen den beiden entgegengesetzten Wolken längere Zeit auf und nieder, indem sie bald von der einen Wolke angezogen, dann aber, wenn sie die Electricität derselben angenommen haben, wieder abgestoßen, und nun von der andern Wolke angezogen werden u. s. w. Während dieser Bewegung schlagen sich dann fortwährend wegen der geringen Temperatur der Eiskörner immer neue Dämpfe auf denselben nieder, wodurch sich ihre Größe und ihr Gewicht immer mehr vergrößert, bis ihr Gewicht so weit gewachsen ist, daß es die electrische Anziehung und Abstoßung überwiegt. Ist dieser Zeitpunkt eingetreten, dann fallen die Hagelkörner nieder. Nach L. v. Buch's Annahme wäre der Vorgang bei der Bildung der Hagelkörner folgender. Wenn am Tage die Sonne mit großer

Digitized by Google

Intenſität auf den Boden ſcheint, ſo erhebt ſich ein lebhaft aufſteigender Luftſtrom, die Dämpfe werden nach Gegenden geführt, wo ſie bald condenſirt werden. Sie fallen als Tropfen herab. Indem ſie in den warmen, noch ſtets aufwärts ſteigenden Strömen theilweiſe ſchnell verdunſten, kann eine ſo große Menge Wärme gebunden werden, daß der andere Theil derſelben gefriert. Tiefer abwärts fallend condenſirt ſich auf ihrer Oberfläche neuer Dampf, welcher ebenfalls bald gefriert, und ſo wird das Hagelkorn gebildet.

§. 358. **Thau, Reif.** Unter Thau verſteht man einen Niederſchlag, welcher ſich beſonders im Sommer an der Oberfläche des Bodens vorzüglich an Pflanzen während der Nacht in der Geſtalt von Tropfen zeigt. Der Thau zeigt ſich in größerer Menge nur in heiteren, windſtillen Nächten. Er ſchlägt ſich vorzugsweiſe an freiſtehenden Körpern nieder, und zwar nicht auf allen Körpern in gleicher Menge (auf Pflanzen iſt er weit reichlicher, als auf dem feſten Erdboden; lockerer Kiesboden wird feuchter, als feſtgetretenes Erdreich; Glas wird weit leichter befeuchtet, als die Metalle). Nicht überall auf der Erde bildet ſich der Thau in gleicher Menge, am häufigſten findet man ihn in den Küſtengegenden warmer Klimate.

Wells hat nachgewieſen, daß die Erſcheinung des Thaues eine Folge der Wärmeſtrahlung ſei. Wenn nämlich der feuchte, mit Pflanzen bedeckte Boden während des Tages von der Sonne erwärmt wird, ſo ſteigen ſehr viele Dämpfe in die Höhe, welche zum Theil in den unteren Regionen der Atmoſphäre bleiben. Nach dem Untergange der Sonne ſtrahlt der Boden ſeine Wärme ſehr ſchnell aus, die Atmoſphäre am Boden iſt oft mehrere Grade kälter, als einige Fuß höher. Dadurch ſchlägt ſich ein Theil der Dämpfe an den feſten Körpern nieder, und es entſteht der Thau. Wenn heitere, windſtille Nächte zu einer reichlichen Bildung deſſelben erforderlich ſind, ſo hat dies ſeinen Grund darin, daß in bewölkten Nächten die Wolken theils ſelbſt Wärme nach der Erdoberfläche ſtrahlen, theils die von der Oberfläche ausgegangenen Wärmeſtrahlen wieder nach derſelben zurückwerfen, und dadurch die Abkühlung derſelben verhindern. Aehnlich wie die Wolken wirkt aber in dieſer Beziehung jede andere Bedeckung, woraus ſich erklärt, daß vorzugsweiſe die freiſtehenden Körper bethauen. In windigen Nächten bildet ſich der Thau deßwegen nicht, weil dann die kalte Luftmaſſe an dem Boden ſtets wieder durch eine wärmere verdrängt wird. Daß nicht alle Körper gleich ſtark bethauen, iſt in dem verſchiedenen Wärmeſtrahlungsvermögen derſelben begründet, wodurch ſich der eine mehr, der andere weniger abkühlt. Um ſich die oben in dieſer Hinſicht angeführten Unterſchiede zu erklären, darf man ſich nur erinnern, daß das Ausſtrahlungsvermögen eines Körpers mit der Dichte ſeiner Oberfläche abnimmt, und daß die Metalle von allen Körpern das kleinſte Wärmeausſtrahlungsvermögen beſitzen. Wenn ſich an manchen Orten der Thau oft und reichlich bildet, an anderen nicht, ſo muß man nur bedenken, daß da, wo die Atmoſphäre nur wenig Waſſer enthält, ſich auch keines niederſchlagen kann.

Werden die Körper durch die Wärmeſtrahlung bis unter den Gefrierpunkt abgekühlt, dann können die niedergeſchlagenen Dämpfe auch nicht tropfbar flüſſig bleiben, ſondern müſſen gefrieren, es entſteht dann der Reif, der alſo in der Regel Nichts Anderes iſt, als gefrorener Thau. Es iſt dies jedoch nicht die einzige Entſtehungsart des Reifes, ſondern er

Digitized by Google

bildet ſich auch noch auf folgende Art. Wenn auf lang dauernde Kälte ein warmer Südwind folgt, ſo ſchlägt ſich der Waſſerdampf an den noch kalten Körpern ohne Ausnahme mit Leichtigkeit unter der Geſtalt des Reifes nieder. Es ſind dies jene ſchönen Fäden, welche wir beſonders zur Zeit von Nebeln an den Aeſten der Bäume und an andern Gegenſtänden bemerken.

Lange Zeit wurde angenommen, daß zuweilen ein Thau herabfalle, welcher den Pflanzen ſehr ſchädlich ſei. Es iſt dies der Mehlthau und Honigthau. Beide ſind klebrige Flüſſigkeiten, welche ſich bisweilen plötzlich auf den Pflanzen zeigen, die Vegetation hindern, den Früchten ſchaden, und ſelbſt bewirken, daß der Genuß der damit benäßten Pflanzen den Thieren ſchädlich iſt. Dieſer Thau rührt aber gar nicht von der Atmoſphäre her, ſondern nach den Unterſuchungen Leche's von den Blattläuſen. Durch zwei auf dem Hinterleibe ſtehende Hörner geben dieſelben ein ſüßes Waſſer von ſich, welches ſich auf die Blätter ſetzt, und dann austrocknet. Wird dieſe Flüſſigkeit nicht von Bienen, Ameiſen und anderen Thieren verzehrt, ſo wird ſie von dem ſtarken Thau aufgelöſt, fließt auf die unteren Blätter, und dieſe ſchrumpfen dadurch zuſammen.

Siebenter Abſchnitt.

Mechanik.

§. 359. Bei der Erklärung der Erſcheinungen der Körperwelt werden wir, wie ſchon ganz zu Anfang bemerkt wurde, zuletzt zur Annahme von Kräften geführt, deren allgemeiner Charakter darin beſteht, daß ſie entweder eine Bewegung wirklich hervorbringen, oder doch hervorzubringen ſuchen. Der Erfolg der Wirkſamkeit einer Kraft iſt alſo Bewegung; wird ihre Wirkung gehemmt, ſo herrſcht Gleichgewicht. Die Lehre vom Gleichgewichte heißt Statik (abgeleitet von ἵστημι ich ſtelle ſtill), diejenige von der Bewegung Dynamik (δύναμις die Kraft); beide zuſammen machen die Mechanik (μηχανή Maſchine) aus. Statik ſowohl, als Dynamik zerfallen jede wieder in drei Abtheilungen je nach dem Aggregatzuſtande der Körper, deren Gleichgewicht oder Bewegung betrachtet wird. Die Abtheilungen der Statik ſind: die Statik im engern Sinn oder die Gleichgewichtslehre der feſten Körper, die Hydroſtatik (ὕδωρ das Waſſer) oder Gleichgewichtslehre der tropfbar flüſſigen Körper, und die Aëroſtatik (ἀήρ Luft) oder Gleichgewichtslehre der ausdehnſam flüſſigen Körper; ebenſo ſind die Abtheilungen der Dynamik: die Dynamik im engern Sinn, die Hydrodynamik und die Aërodynamik oder Pneumatik (πνεῦμα bewegte Luft).

Jede Kraft wirkt unmittelbar nur auf einen Punkt, den ſ. g. Angriffspunkt, den ſie nach einer gewiſſen Linie hin, welche die Richtung der Kraft anzeigt, in Bewegung zu ſetzen ſucht. Man unterſcheidet zweierlei Arten von bewegenden Kräften: 1) momentane, d. h. ſolche,

Digitized by Google

die nur einen Augenblick wirken, hernach aber das Bewegliche ganz sich selbst überlassen, und 2) *continuirliche*, d. h. solche, deren Thätigkeit durch eine angebbare Zeit ununterbrochen fortdauert. Die Aeußerung einer momentanen Kraft heißt auch *Stoß*, die einer continuirlichen *Druck* oder *Zug*.

Das Bestreben einer bewegenden Kraft besteht nach dem Gesagten darin, den Angriffspunkt, und, wenn mit demselben eine Masse in Verbindung steht, auch diese zu bewegen, d. h. sie zu veranlassen, in einer bestimmten Zeit einen bestimmten Weg zurückzulegen. Wenn auch die Kraft nur momentan wirkt, so erzeugt sie doch eine dauernde Bewegung wegen des Beharrungsvermögens der Körper, und wenn kein Hinderniß obwaltet, so folgt die bewegte Masse, wie im zweiten Kapitel gezeigt wird, einer graden Linie, und legt in gleichen Zeiten auch gleiche Räume zurück. Eine solche Bewegung heißt eine *gleichförmige Bewegung*, und unter der *Geschwindigkeit* derselben versteht man den in der Zeiteinheit, als welche die Zeitsecunde allgemein angenommen wird, zurückgelegten Weg. Eine continuirliche Kraft läßt sich als eine Summe von momentanen Kräften betrachten, deren Wirkungen unmittelbar auf einander folgen. Hier muß also das Bewegliche zu der Geschwindigkeit, welche es vermöge der vorausgegangenen Wirkungen der Kraft schon hat, in jedem Augenblicke einen neuen Zuwachs erhalten, oder dessen Geschwindigkeit muß mit der Zeit wachsen. Eine solche Bewegung nun, bei welcher in jeder folgenden Zeiteinheit ein größerer Weg zurückgelegt wird, als in der unmittelbar vorher gehenden, heißt *beschleunigte Bewegung*. Daß bei derselben nicht mehr von ihrer Geschwindigkeit im Allgemeinen, sondern nur von der Geschwindigkeit in einem bestimmten Zeitmomente, von einer *Endgeschwindigkeit*, gesprochen werden kann, ist klar, und man versteht dann denjenigen Weg darunter, welchen der bewegte Körper, wenn er die Geschwindigkeit, welche er in diesem Momente hat, unverändert beibehielte, in der nächsten Secunde zurücklegen würde. Ist ein Bewegliches in dem Augenblicke, in welchem die Einwirkung einer continuirlichen Kraft auf dasselbe beginnt, bereits mit einer gewissen Geschwindigkeit in Bewegung, und will die continuirliche Kraft es in entgegengesetzter Richtung bewegen, als diejenige ist, welche es schon hat, so wird die Geschwindigkeit des Beweglichen in jedem Augenblicke um eine gewisse Größe vermindert. In diesem Falle sagt man, das Bewegliche habe eine *verzögerte Bewegung*. Wie bei der beschleunigten, so versteht man auch bei der verzögerten Bewegung unter der Geschwindigkeit in einem bestimmten Momente den Weg, welchen das Bewegliche in der nächsten Secunde zurücklegen würde, wenn die Geschwindigkeit, welche es in diesem Momente grade besitzt, unverändert bliebe.

§. 360. Es liegt in der Natur der Sache, daß dieselbe momentane Kraft demselben Beweglichen immer dieselbe Geschwindigkeit ertheilt, daß dagegen der Größe nach verschiedene momentane Kräfte demselben Beweglichen auch verschiedene Geschwindigkeit ertheilen müssen, und daß in diesem letzteren Falle *die Geschwindigkeiten in demselben Verhältnisse zu einander stehen müssen, wie die Kräfte*. Bezeichnet man daher die Kräfte mit P und p, und die entsprechenden Geschwindigkeiten mit C und c, so ist $P : p = C : c$. Wirkt aber dieselbe momen-

Digitized by Google

tane Kraft auf verſchiedene frei bewegliche Körper ein, ſo ſehen wir dieſe ſich in der Regel mit verſchiedener Geſchwindigkeit bewegen, und es hängt demnach die Geſchwindigkeit, mit welcher ein Bewegliches von einer ſolchen Kraft fortgetrieben wird, nicht allein von der Stärke dieſer Kraft, ſondern auch von dem Beweglichen ſelbſt ab. Je mehr materielle Theilchen in Bewegung zu ſetzen ſind, d. h. je größer die Maſſe des Beweglichen iſt, deſto größer muß offenbar unter ſonſt gleichen Umſtänden die bewegende Kraft ſein, und es müſſen in dieſem Falle die Kräfte in demſelben Verhältniſſe zu einander ſtehen, wie die Maſſen. Sind M und m die Maſſen zweier verſchiedenen Körper, und iſt C = c, ſo iſt alſo P : p = M : m. Nennt man Q die Kraft, welche der Maſſe M die Geſchwindigkeit c zu ertheilen vermag, ſo iſt nach dem erſten der mitgetheilten Geſetze P : Q = C : c, und nach dem zweiten Q : p = M : m, alſo P × Q : Q × p = MC : mc, oder, wenn man die Glieder des vorderen Verhältniſſes durch Q theilt, P : p = MC : mc, d. h. zwei momentane Kräfte verhalten ſich ganz allgemein zu einander wie die Producte aus den bewegten Maſſen in ihre Geſchwindigkeiten. Wählt man als Maß der Kräfte jene Kraft zur Einheit, welche der Maſſe 1 die Geſchwindigkeit 1 beibringt, ſo hat man, wenn m = 1 und c = 1, auch p = 1, und es iſt P : 1 = MC : 1 × 1, mithin P = MC, d. h. die Größe einer Kraft wird beſtimmt durch das Product aus der Maſſe in die Geſchwindigkeit, weßhalb man auch dieſes Product die Größe der Bewegung nennt. Bewegt eine und dieſelbe Kraft die Maſſe M mit der Geſchwindigkeit C und die Maſſe M′ mit der Geſchwindigkeit C′, ſo iſt MC = M′C′, weil beide Werthe = P ſind, und alſo M : M′ = C′ : C, d. h. bei gleichen Kräften verhalten ſich die Maſſen umgekehrt wie die Geſchwindigkeiten.

Erſtes Kapitel.

Statik.

A. Zuſammenſetzung und Zerlegung der Kräfte.

§. 361. Wenn mehrere gleichartige Kräfte auf einen Punkt nach verſchiedenen Richtungen wirken, ſo heben ſich dieſelben entweder gegenſeitig auf, ſo daß aus ihrem Zuſammenwirken keine Anregung zur Bewegung entſpringt, oder es geht eine Anregung zur Bewegung hervor, in Folge welcher der Punkt nach einer beſtimmten Richtung fortzuſchreiten ſtrebt. Letzterer Effect könnte ſtets durch eine einzige, nach dieſer Richtung mit angemeſſener Stärke wirkende Kraft hervorgebracht werden, deren Wirkung alſo jener der vorhandenen Kräfte gleich iſt, und ſomit denſelben ſubſtituirt werden darf. Dieſe eine Kraft, welche auf den Punkt ganz dieſelbe Wirkung hervorbringen würde, wie die wirklich einwirkenden Kräfte, nennt man die reſultirende Kraft, während die letzteren die Seitenkräfte oder Componenten heißen. Die reſultirende Kraft mehrerer Kräfte finden, heißt die Kräfte zuſammenſetzen; ſtatt einer Kraft mehrere ihr gleichgeltende ſetzen, heißt die Kraft zerlegen.

Digitized by Google

Zwei Kräfte wirken auf einen Punkt entweder 1) ganz nach derselben Richtung, oder 2) nach grade entgegengesetzten Richtungen, oder 3) die Richtungen der Kräfte bilden einen Winkel. Es erhellt von selbst, daß die Resultirende solcher Kräfte, welche nach derselben Richtung gleichzeitig auf denselben Punkt einwirken, der Summe aller Kräfte gleich sei, und nach eben dieser Richtung wirke. Treiben aber zwei Kräfte einen Punkt nach grade entgegengesetzten Richtungen, so ist die Resultirende dem Unterschiede der Kräfte gleich, und wirkt nach der Richtung der größeren Seitenkraft. Der dritte der angeführten Fälle bietet der Betrachtung mehr Schwierigkeiten dar, und wird in den folgenden Paragraphen deßhalb ausführlicher besprochen.

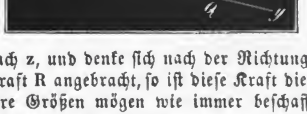
§. 362. Man kann eine Kraft, ohne daß ihr Effect geändert wird, auf jeden in ihrer Richtung liegenden Punkt wirken lassen, wenn dieser nur mit dem ursprünglichen Angriffspunkt der Kraft unveränderlich verbunden ist.

Fig. 99.

Es wirke eine Kraft P auf den Punkt A (Fig. 99) nach der Richtung Ax, ferner sei B ein anderer Punkt in der Richtung Ax, welcher mit A so verbunden ist, daß beide einander nicht genähert, und nicht von einander weiter entfernt werden können. Werden nun in B zwei der Kraft P gleiche Kräfte P′ und — P′ nach den Richtungen Bx und BA wirkend angebracht, so wird dadurch an der Wirkung der Kraft P Nichts geändert, weil sich die Kräfte P′ und — P′ selbst aufheben. Allein auch die Kräfte P und — P′ heben sich einander auf, weil sie nur darauf hinwirken, die beiden Punkte A und B einander zu nähern, dieses aber nicht bewerkstelligt werden kann. Es ist demnach die Wirkung der Kraft P auf B dieselbe, wie jene derselben Kraft auf A.

§. 363. Wenn die Richtungen zweier Kräfte einen Winkel einschließen, so können die Kräfte einander nicht aufheben.

Fig. 100.



Es sei A (Fig. 100) der Angriffspunkt, Ax die Richtung der Kraft P, Ay diejenige der Kraft Q. Man nehme an, beide Kräfte heben einander auf. Man verlängere xA nach z, und denke sich nach der Richtung Az eine der Kraft P entgegengesetzte Kraft R angebracht, so ist diese Kraft die Resultirende von allen drei Kräften, ihre Größen mögen wie immer beschaffen sein, also auch, wenn R = P ist. Im letzteren Falle kann man aber, weil auch P und R einander aufheben, Q als die Resultirende von P, Q und R betrachten. Es würde also dem Punkte A eine Bewegung nach der Richtung Az und zu gleicher Zeit auch eine Bewegung nach der Richtung Ay mitgetheilt werden, was nicht möglich ist. Die Kräfte P und Q heben daher nicht auf, sondern haben eine Resultirende.

§. 364. Die Richtung der Resultirenden fällt in die Ebene, welche durch die Richtungen der zwei Kräfte bestimmt

Digitized by Google

ist, und liegt der Richtung der größeren der beiden Seitenkräfte näher, als der Richtung der kleineren Seitenkraft.

Es ist kein Grund vorhanden, warum diese Richtung mehr auf der einen, als auf der anderen Seite außerhalb genannter Ebene liegen sollte. Die Kraft P (Fig. 100) wirke auf den Punkt A nach der Richtung Ax. Wird nun eine zweite auf den Punkt A wirkende Kraft Q, deren Richtung Ay mit der Richtung Ax einen Winkel einschließt, hinzugedacht, so besteht deren Wirkung offenbar darin, die Bewegung des Punkes A oder doch das Bestreben desselben von der Richtung Ax in eine zwischen Ax und Ay liegende Richtung zu bringen. Je größer nun Q gegen P ist, desto größer wird diese Ablenkung sein, d. h. desto näher wird die Richtung der Resultirenden beider Kräfte der Ay liegen, und einen desto kleineren Winkel wird sie mit ihr bilden.

§. 365. Zwei auf einen Punkt unter einem Winkel wirkende gleiche Kräfte haben eine Resultirende, deren Richtung den Winkel halbirt.

Der Grund, welcher die Resultirende der einen Kraft näher zu bringen vermöchte, müßte dies auch in Bezug auf die andere Kraft thun.

Ein Parallelogramm, dessen zwei aneinander stoßende Seiten sich verhalten wie die Kräfte, und zugleich auch deren Richtungen vorstellen, heißt Kräfteparallelogramm. Da nun in einem Parallelogramm, dessen an einander stoßende Seiten gleich groß sind, die Diagonale den Winkel, welchen diese Seiten einschließen, halbirt, so ist also jetzt bewiesen, daß für 2 gleiche Kräfte die Richtung der Resultirenden durch die Diagonale des Kräfteparallelogramms gegeben ist.

§. 366. Für zwei ungleiche, aber commensurable Kräfte, welche nach verschiedenen Richtungen auf einen Punkt einwirken, soll die Richtung ihrer Resultirenden gefunden werden.

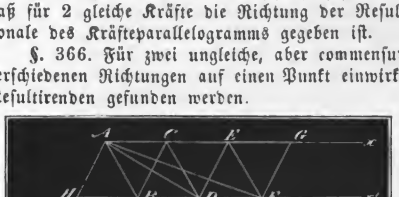


Fig. 101.

P und Q seien die 2 Kräfte, welche nach den Richtungen Ax und Ay (Fig. 101) auf den Punkt A einwirken. Man setze statt der Kraft P eine ihr gleiche Summe von Kräften p, p', p'' u. s. w., so daß $P = p + p' + p'' + \ldots$. Ist nun Az die Richtung der Resultirenden von Q und p, so kann man in ihr einen Punkt B annehmen, und dahin den Angriffspunkt dieser Resultirenden versetzen. Weil aber diese dieselbe Wirkung hat, wie Q und p, so kann man sie in B wieder in Q und p zerlegen. Zieht man daher Bx' || Ax und By' || Ay, so ist es einerlei, ob Q und p nach den Richtungen Ay und Ax auf A, oder nach den Richtungen By' und Bx' auf B wirken. Man verlängere nun By' nach C, und versetze dahin den Angriffspunkt der Kraft Q. Ebendahin kann man aber auch den Angriffspunkt der zunächst auf A in der Richtung Ax wirkenden Kraft p' versetzen, so daß demnach C der Angriffspunkt von Q und p' ist. Es sei nun wieder Cz' die Richtung der Resultirenden dieser

Digitized by Google

2 Kräfte, so kann man den Angriffspunkt derselben in jenen Punkt der Cz′ versetzen, in welchem diese die Bx′ schneidet, nämlich nach D. Ebendahin kann man aber auch den Angriffspunkt der Kraft p bringen, wornach D der gemeinschaftliche Angriffspunkt der Kräfte Q und p + p′ oder ihrer Resultirenden ist. D muß also ein Punkt in der Richtung dieser Resultirenden sein, und diese selbst die Richtung AD haben. Man denke sich ferner in D die Kräfte p + p′ nach Dx′ und Q nach Dy″ wirkend, und verlängere Dy″ nach E, wo sie die Ax schneidet. Da nun E ein Punkt in der Richtung der Kraft Q ist, so kann man dahin ihren Angriffspunkt versetzt denken. Ebendahin läßt sich auch der Angriffspunkt der Kraft p″ versetzen, so daß demnach auf E die 2 Kräfte Q und p″ wirken. Es sei Ez″ die Richtung ihrer Resultirenden, und F jener Punkt derselben, wo sie die Bx′ schneidet. Den Punkt F kann man daher auch als Angriffspunkt der Kräfte Q und p″ betrachten. Aber auch jener der Kräfte p + p′ läßt sich von D aus dahin versetzen, und somit F als gemeinschaftlicher Angriffspunkt der Kräfte Q und p + p′ + p″ oder ihrer Resultirenden ansehen. F muß demnach selbst in der Richtung dieser Resultirenden liegen, und somit diese Richtung, da sie auch durch A geht, AF sein. Ebenso schließt man weiter, wenn P als Summe von noch mehr als 3 Kräften p gedacht wird. Verlängert man BD bis H, so erscheinen sowohl die Linien AB, CD, EF, als auch AD und AF als Diagonalen von Parallelogrammen, deren Seiten denselben Winkel einschließen, unter welchem die Richtungen der Kräfte Q und P gegen einander geneigt sind. Ueber das Verhältniß der Seiten dieser Parallelogramme zu einander kann aber erst dann Etwas bestimmt werden, wenn man für die Größe der Kräfte p, p′, p″ u. s. w. und ihr Verhältniß zu Q bestimmte Voraussetzungen macht. Es sei z. B. $p = p' = p'' = p'''$ u. s. w. $= Q$, mithin $P = nQ$, wo n eine ganze Zahl bedeutet, dann halbiren nach §. 365 die Linien AB, CD, EF die Winkel CAH, ECB, GED, und die Parallelogramme CAHB, ECBD, GEDF sind gleichseitig, und $AC = CE = EG = AH$, AE also $= 2AH$, $AG = 3AH$. AD ist die Richtung der Resultirenden von Q und p + p′, welche sich wie 1 : 2 verhalten, aber auch die Diagonale von AHDE, dessen Seiten sich auch wie 1 : 2 verhalten. AF ist die Richtung der Resultirenden von Q und p + p′ + p″, welche sich wie 1 : 3 verhalten, aber auch die Diagonale von GAHF, dessen Seiten sich ebenfalls wie 1 : 3 verhalten. Es wird demnach für Kräfte, deren eine ein Vielfaches der anderen ist, die Richtung der Resultirenden durch die Diagonale des Kräfteparallelogrammes angezeigt. Die Aufgabe soll aber nicht nur für diesen speciellen Fall, sondern allgemein für jede 2 commensurable Kräfte, d. h. solche, die beide Vielfache einer gemeinschaftlichen Einheit sind, gelöst werden. Ist demnach p diese Einheit für P und Q, dann kann man $p = p' = p'' = p'''$ u. s. w. $= \frac{Q}{n}$ setzen. AB ist die Resultirende von Q und p, welche sich wie n : 1 verhalten, es ist aber auch die Diagonale von CAHB, dessen Seiten AH und AC sich ebenfalls wie n : 1 verhalten. Ebenso ist AD die Resultirende zweier Kräfte Q und p + p′, welche sich wie n : 2 verhalten, und die Diagonale eines Parallelogramms, dessen Seiten sich ebenfalls wie n : 2 verhalten u. s. w. Es wird also allgemein für

Digitized by Google

jede 2 commensurable Kräfte die Richtung der Resultirenden durch die Diagonale des Kräfteparallelogramms angezeigt.

§. 367. Dieselbe Richtung hat aber auch die Resultirende bei der Einwirkung zweier incommensurablen Kräfte, also in allen Fällen.

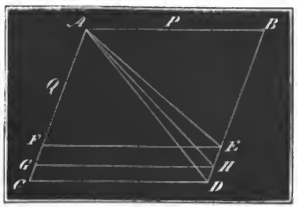


Fig. 102.

Es sei A (Fig. 102) der Angriffspunkt der 2 incommensurablen Kräfte P und Q, deren Richtungen und Größen durch AB und AC vorgestellt werden, und man nehme an, die Richtung ihrer Resultirenden sei nicht die Diagonale AD, sondern AE. Man ziehe durch E die grade Linie EF || CD, und denke sich AB in gleiche Theile getheilt, deren jeder aber kleiner ist, als FC, so daß, wenn sie von A aus auf AC übertragen werden, ein Theilungspunkt zwischen F und C, z. B. nach G, falle. Denkt man sich nun mit P zugleich statt Q eine andere Kraft auf A nach der Richtung AC wirkend, deren Größe durch AG dargestellt werde, so muß, da AG und AB commensurabel sind, ihre Resultirende die Richtung AH haben (§. 366), wenn GH mit AB parallel gezogen worden ist. Es kann aber wegen AC = AG + GC die Resultirende der Kräfte AB und AC auch als Kraft betrachtet werden, welche aus dem Zusammenwirken der 3 Kräfte AB, AG und GC hervorgeht. Die Richtung dieser Resultirenden muß demnach zwischen AH und AC fallen (§. 364), und kann also nicht AE sein. Ebenso läßt es sich für jeden anderen Punkt außer D zeigen, und somit kann die Resultirende keine andere Richtung haben, als die Diagonale AD.

§. 368. Die Resultirende zweier Kräfte, welche unter einem Winkel auf einen Punkt einwirken, wird aber auch der Größe nach durch die Länge der Diagonale des Kräfteparallelogrammes dargestellt.

Fig. 103.

Es seien AB und AC (Fig. 103) die Kräfte P und Q, AD die Richtung ihrer Resultirenden, R die Größe der Resultirenden, AE die Größe und Richtung einer Kraft R', welche der Kraft R gleich und entgegengesetzt ist. Nun ist offenbar zwischen P, Q und R' Gleichgewicht. Construirt man das Parallelogramm AEFC, so ist AF die Richtung der Resultirenden S von Q und R'. Statt Q und R' kann also S gesetzt werden, und da zwischen P, Q und R' Gleichgewicht stattfand, so muß

Digitized by Google

auch zwiſchen P und S Gleichgewicht ſtattfinden, folglich müſſen AB und AF in grader Linie liegen (§. 363). Es iſt alſo ∢EAF = ∢BAD, ∢AEF = ∢BDA, EF = AC = BD, folglich △ EAF ≅ △ ABD, und AE = AD, AE war = R' = R, folglich iſt auch AD = R.

§. 369. Da alle Elemente eines Parallelogrammes in dem von 2 an einander ſtoßenden Seiten und der Diagonale deſſelben gebildeten Dreiecke enthalten ſind, ſo reduciren ſich auch alle Fragen über die Zuſammenſetzung zweier auf einen Punkt wirkender, einen Winkel einſchließender Kräfte auf die Auflöſung eines Dreiecks, und die Beantwortung derſelben kann mit Hilfe der 3 folgenden, aus der Trigonometrie bekannten Gleichungen $R^2 = P^2 + Q^2 + 2PQ \times \cos.m$, $P : R = \sin.y : \sin.m$ und $Q : R = \sin.x : \sin.m$ gegeben werden.

§. 370. Soll für mehr, als 2 Kräfte, welche einen gemeinſchaftlichen Angriffspunkt haben, und nach verſchiedenen Richtungen wirken, die Reſultirende gefunden werden, ſo ſetzt man nach den vorangegangenen Paragraphen erſt zwei der gegebenen Kräfte zuſammen, ihre Reſultirende alsdann mit einer dritten u. ſ. f. Die letzte Reſultirende, welche auf dieſe Weiſe gefunden wird, iſt alsdann auch die Reſultirende aller der gegebenen Kräfte.

§. 371. Durch ein umgekehrtes Verfahren kann man jede Kraft in eine beliebige Anzahl von Kräften zerlegen, welche zuſammen ihr an Wirkung gleich kommen. Um nämlich eine Kraft zunächſt in 2 Kräfte zu zerlegen, darf man ſie nur als Diagonale eines Parallelogrammes betrachten; die in dem Angriffspunkt derſelben zuſammenſtoßenden Seiten des Parallelogrammes geben die Richtungen und Größen der geſuchten Kräfte an. Da indeſſen jede gegebene grade Linie ſich als Diagonale unzählig vieler Parallelogramme betrachten läßt, ſo kann auch eine ihrer Richtung und Größe nach gegebene Kraft auf unzählig viele Arten in zwei Kräfte zerlegt werden. Dieſe Zerlegungen beſchränken ſich jedoch auf eine einzige, wenn zu gleicher Zeit noch einer der folgenden Bedingungen Genüge geleiſtet werden ſoll: 1) daß die Componenten gegebene Richtungen, oder 2) gegebene Größen haben ſollen, oder 3) daß die eine Componente eine gegebene Richtung und eine gegebene Größe, oder 4) daß die eine Componente eine gegebene Richtung und die andere eine gegebene Größe habe. Für die erſte Bedingung müſſen jedoch die gegebenen Richtungen ſo beſchaffen ſein, daß ſie die Richtung der zu zerlegenden Kraft zwiſchen ſich enthalten, für die zweite Bedingung muß die Summe der Componenten größer, und zugleich ihr Unterſchied kleiner ſein, als die Größe der zu zerlegenden Kraft, für die vierte Bedingung endlich muß die gegebene Größe der einen Componente größer ſein, als die zu zerlegende Kraft.

Indem man mit jeder der gefundenen Kräfte wieder ſo verfährt, zerlegt man eine gegebene Kraft in jede beliebige Anzahl von Kräften.

§. 372. Mit Hilfe der ſo eben erwieſenen Sätze kann man auch die Zuſammenſetzung von Kräften bewerkſtelligen, welche in derſelben Ebene wirken, und verſchiedene Angriffspunkte haben, wenn dieſe Punkte nur unveränderlich mit einander verbunden ſind.

Digitized by Google

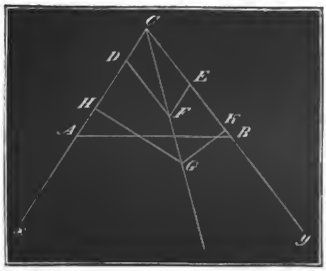


Fig. 104.

Es seien z. B. A und B (Fig. 104) die Angriffspunkte der nach den divergirenden Richtungen Ax und By wirkenden Kräfte P und Q. Man verlängere Ax und By, bis sie sich in C schneiden, versetze den Angriffspunkt jeder der beiden Kräfte nach C, nehme die Stücke CD und CE so an, daß CD : CE = P : Q ist, construire das Parallelogramm CDFE, so ist CF der Resultirenden von P und auch die Richtung der Resultirenden.

und Q proportional, und CFG

§. 373. Wenn die Kräfte in verschiedenen Punkten angreifen, so verhalten sie sich auch immer umgekehrt wie die Senkrechten, welche von irgend einem Punkte der Resultirenden auf ihre Richtungen gezogen werden.

Von dem Punkte G (Fig. 104) auf der Richtung der Resultirenden sei GH senkrecht auf Cx und GK senkrecht auf Cy. Nach §. 372 war P : Q = CD : CE. Es ist aber CD : DF = sin. DFC : sin. DCF oder CD : CE = sin. FCE : sin. DCF; folglich P : Q = sin. FCE : sin. DCF . sin. FCE ist = $\frac{GK}{CG}$ und sin. DCF = $\frac{GH}{CG}$, also P : Q = $\frac{GK}{CG} : \frac{GH}{CG}$ = GK : GH.

§. 374. Wenn zwei Kräfte an zwei unveränderlich verbundenen Angriffspunkten nach parallelen Richtungen und nach derselben Gegend hin wirken, so ist ihre Resultirende gleich der Summe der gegebenen Kräfte, und wirkt mit ihnen parallel. Auch theilt die Richtung der Resultirenden die Verbindungslinie der beiden Angriffspunkte in zwei Theile, welche mit den Kräften in umgekehrtem Verhältniß stehen.

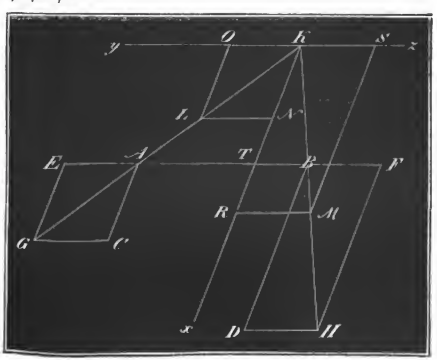


Fig. 105.

A und B (Fig. 105) seien die Angriffspunkte, AC und BD die Richtungen und Größen der Kräfte. Man kann ohne Aenderung des Effects in A und B zwei gleiche und entgegengesetzte Kräfte, deren Richtungen Verlängerungen der Verbindungslinie AB sind, anbringen. AE und BF seien diese Kräfte, so setze man AE mit AC und BF mit BD zusammen.

Digitized by Google

Ihre Resultirenden seien AG und BH. Verlängert man die Graden AG und BH, bis sie sich schneiden, so kann ihr Durchschnittspunkt K, insofern er mit A und B unveränderlich verbunden gedacht wird, den gemeinschaftlichen Angriffspunkt der vier Kräfte AC, AE, BD und BF vorstellen. Man mache KL = AG und KM = BH, ziehe Kx || AC || BD, und yKz || AB. Man zerlege KL in KO und KN. KO ist aber = AE, und KN = AC wegen der Congruenz der Dreiecke KOL und AEG, sowie KLN und ACG. Ebenso zerlege man KM in KR und KS, KS ist aber wieder = BF, und KR = BD. Da aber KO und KS sich als gleiche und entgegengesetzte Kräfte aufheben, so bleibt als Resultirende KN + KR = AC + BD = P + Q. Es wäre also der erste Theil des Satzes bewiesen. Ferner ist △AEG ∽ △ATK und △BFH ∽ △BTK, folglich AE : EG = AT : TK und BF : FH = BT : TK. Da AE = BF und TK = TK, so ist EG × AT = FH × BT oder EG : FH = BT : AT oder P : Q = BT : AT, wodurch auch der zweite Theil des Satzes bewiesen ist.

Da die Bestimmung des Punktes T unabhängig von dem Winkel erfolgte, welchen P und Q mit AB machen, so muß dieser Punkt derselbe bleiben, wenn sich die Richtungen von P und Q ohne Aenderung des Parallelismus um ihre Angriffspunkte drehen. Deßhalb heißt der Punkt T der *Mittelpunkt der parallelen Kräfte*.

Es ist für sich klar, daß man durch dieses Verfahren von mehreren parallelen und gleich gerichteten Kräften die Resultirende ebenfalls finden könne. Man darf hier nur zuerst für zwei dieser Kräfte die Resultirende suchen, dann die Resultirende für die so eben gefundene und die dritte gegebene Kraft, deren Resultirende man ebenso mit der vierten Kraft combinirt u. s. w. Die letzte Resultirende wird offenbar die Resultirende aller gegebenen Kräfte und der Summe dieser Kräfte gleich sein. Betrachtet man den Mittelpunkt je zweier Kräfte als den Angriffspunkt ihrer Resultirenden, so ist der letzte so erhaltene Mittelpunkt auch der *Mittelpunkt des ganzen Systems* der gegebenen Kräfte, d. h. er besitzt die Eigenschaft, daß die Richtung der Resultirenden aller gegebenen Kräfte stets durch ihn geht, wenn man auch den Richtungen dieser Kräfte ohne Aenderung der Angriffspunkte andere parallele Lagen ertheilt. Nicht minder klar ist es, daß man auch umgekehrt jede gegebene Kraft in jede beliebige Anzahl paralleler nach derselben Gegend gerichteter Kräfte auflösen könne, deren Summe der gegebenen Kraft gleich ist.

§. 375. *Wenn die Richtungen der Kräfte parallel sind, sie aber nach entgegengesetzten Richtungen wirken, so ist ihre Resultirende gleich ihrem Unterschiede, sie wirkt mit der größeren Kraft nach einerlei Richtung, und ihre Richtung durchschneidet die Verbindungslinie der Angriffspunkte der Kräfte in 2 Theile, welche sich umgekehrt wie die Kräfte verhalten.*

Digitized by Google

Fig. 106.

Es seien Ax und By (Fig. 106) die Richtungen der Kräfte P und Q, A und B ihre Angriffspunkte, und es sei $P < Q$. Man kann sich Q in 2 Theile zerlegt denken, wovon der eine P', dessen Richtung Ax' sei, der Kraft P gleich und entgegengesetzt ist, während der andere R, dessen Größe und Angriffspunkt noch unbekannt ist, in C angebracht sei, und längs Cz mit Q parallel wirke. Da sich P und P' aufheben, so bleibt nur die Kraft R übrig. Diese ist daher die Resultirende von P und Q. Q ist aber $= P' + R$, also auch $= P + R$, und demnach $R = Q - P$. Wir sehen also, die Resultirende R wirkt mit der größeren Kraft Q nach einerlei Richtung und ist dem Unterschiede der beiden gegebenen Kräfte gleich. Nach §. 374 ist $P' : R = BC : AB$, also auch $P' : P' + R = BC : BC + AB$, oder $P : Q = BC : AC$, wodurch auch der letzte Theil des Satzes bewiesen ist.

Auch hier ist C unabhängig von der Neigung der Kräfte gegen AC, und also wieder ein Mittelpunkt der Kräfte. Da $P : R = BC : AB$, so ist $BC = \frac{P \times AB}{R}$. Je kleiner nun der Unterschied zwischen Q und P, desto kleiner ist R, desto größer also der Werth von BC, d. h. desto weiter rückt der Punkt C über B hinaus. Ist $P = Q$, so ist $R = 0$, und also der Werth von $BC = \infty$, d. h. in diesem Falle gibt es gar keine Resultirende.

§. 376. Das Product aus einer Kraft in die Senkrechte, welche aus einem gegebenen Punkte auf die Richtung dieser Kraft gezogen wird, heißt das Moment der Kraft in Beziehung auf diesen Punkt.

Liegt der Punkt, auf welchen das Moment bezogen wird, in der Richtung der Resultirenden zweier Kräfte, so sind die Momente der beiden Kräfte für diesen Punkt einander gleich.

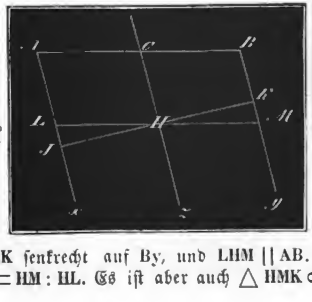


Fig. 107.

Die Richtungen der beiden Kräfte sind entweder parallel oder nicht. Für den ersten Fall seien A und B (Fig. 107) die Angriffspunkte der 2 Kräfte P und Q, Ax und By ihre Richtungen, und $Ax \parallel By$, Cz sei die Richtung der Resultirenden, welche AB in C durchschneide, H sei ein Punkt auf dieser Richtung, für welchen die Momente von P und Q als gleich bewiesen werden sollen. Man ziehe HJ senkrecht auf Ax und HK senkrecht auf By, und $LHM \parallel AB$. Nach §. 374 ist $P : Q = BC : AC = HM : HL$. Es ist aber auch $\triangle HMK \sim \triangle JHL$, also $HM : HL = HK : HJ$

Digitized by Google

und $P : Q = HK : HJ$ oder $P \times HJ = Q \times HK$. Der zweite Fall ist schon in §. 373 bewiesen.

§. 377. Ein innerhalb des Winkels der Richtungen zweier Kräfte befindlicher Punkt, für welchen die Momente der Kräfte gleich sind, muß in der Richtung ihrer Resultirenden liegen.

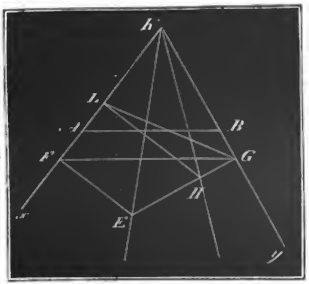


Fig. 108.

Erster Fall. Die Richtungen der Kräfte sind nicht parallel. Für den Punkt E (Fig. 108) sei $P \times EF = Q \times EG$. Gesetzt nun die Resultirende von P und Q gehe nicht durch E, so gehe sie durch H. Man verlängere Ax und By, bis sie sich in K schneiden, und ziehe KH, so wäre dieses die Richtung der Resultirenden. Zieht man nun HL senkrecht auf Ax, so ist nach dem vorhergehenden Paragraphen $P \times HL = Q \times HG$ und $\frac{Q}{P} = \frac{HL}{HG}$, und da $P \times EF = Q \times EG$ war, so ist auch $\frac{Q}{P} = \frac{EF}{EG}$, also $\frac{EF}{EG} = \frac{HL}{HG}$ oder $EF : EG = HL : HG$. Es ist aber auch $\sphericalangle FEG = \sphericalangle LHG$, folglich $\triangle FEG \sim \triangle LHG$, und $\sphericalangle FGE = \sphericalangle LGH$, was unmöglich ist. Die Resultirende geht also durch E.

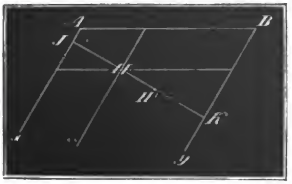


Fig. 109.

Zweiter Fall. Die Richtungen der Kräfte sind parallel. Es sei (Fig. 109) $P \times HJ = Q \times HK$. Gesetzt die Resultirende gehe nicht durch H, sondern durch den Punkt H' auf JK, so wäre $P \times JH' = Q \times H'K$, und es verhielten sich $HJ : H'J = HK : H'K$, was unmöglich ist, weil $HJ < H'J$ und $HK > H'K$ ist.

B. Vom Schwerpunkte fester Körper.

§. 378. Aus den Gesetzen der Bewegung der Himmelskörper hat Newton bewiesen, daß die Schwerkraft von der materiellen Verschiedenheit der Körper ganz unabhängig ist, und nur im graden Verhältniß mit dem Producte der Massen des anziehenden und des angezogenen Körpers, und im umgekehrten mit dem Quadrate der Entfernung beider Körper zunimmt. Ist P die Kraft, welche die Masse M auf die Masse m in der Entfernung D ausübt, und P' die Kraft, welche zwischen den Massen M' und m' in der Entfernung D' wirksam ist, so ist also $P : P' = \frac{Mm}{D^2} : \frac{M'm'}{D'^2}$

Setzt man hier $M' = 1$, $m' = 1$ und $D' = 1$ und $P' = p$, wo also p die Kraft ist, welche zwischen 2 Massen, deren jede $= 1$ ist, in der Entfer-

Digitized by Google

nung 1 herrscht, so ist $P = p \times \frac{Mm}{D^2}$. In dieser Gleichung bedeuten jedoch M und m Massen von so geringer Ausdehnung, daß es gleichgültig ist, zwischen welchen ihrer Punkte man die Entfernung D mißt. Hat daher entweder der anziehende, oder der angezogene, oder beide Massen eine angebbare Ausdehnung, so muß man die Kraft, mit welcher jeder Punkt jeden anderen afficirt, mittelst dieser Formel besonders ausdrücken, und den Totaleffect aller dieser Kräfte bestimmen.

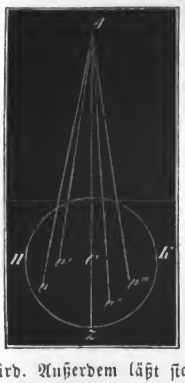


Fig. 110

§. 379. Es sei HK (Fig. 110) die Erde, A ein außerhalb derselben befindlicher Punkt, seine Masse = m, und man soll die Anziehung finden, welche die Erde gegen denselben ausübt. Theilen wir die Erde in unendlich kleine Theilchen μ, μ', μ'' u. s. w., so erfährt der Punkt A von diesen Theilchen die Anziehung $p \times \frac{\mu m}{A\mu^2}$, $p \times \frac{\mu' m}{A\mu'^2}$, $p \times \frac{\mu'' m}{A\mu''^2}$ u. s. w. Die Resultirende aller dieser Kräfte gibt also die Anziehung an, welche die gesammte Masse der Erde gegen den Punkt A äußert. Wenn aber die Erde eine durchaus gleichförmig dichte Kugel ist, oder wenn sie wenigstens in gleichen Abständen von dem Mittelpunkte einerlei Dichte hat, so muß nothwendig die Richtung dieser Resultirenden in einer graden Linie ACz liegen, welche von dem Punkte A durch den Mittelpunkt der Erde gezogen wird. Außerdem läßt sich durch Anwendung höherer Rechnung zeigen, daß die Anziehung der Erde unter den gemachten Voraussetzungen, welche von der Wahrheit nicht stark abweichen, so erfolgt, als wäre ihre ganze Masse in ihrem Mittelpunkt vereinigt. A wird also gegen den Mittelpunkt der Erde mit der Kraft $p \times \frac{Mm}{D^2}$ hinzogen, wo M die Masse der Erde, und D die Entfernung des Punktes A von dem Erdmittelpunkt bezeichnet.

§. 380. Setzen wir jetzt statt des materiellen Punktes A einen Körper, d. h. ein Aggregat von materiellen Punkten, so kann man sich vorstellen, als würde jeder dieser materiellen Punkte mit einer seiner Masse direct, und dem Quadrate seines Abstandes von dem Erdmittelpunkt verkehrt proportionalen Kraft nach diesem Mittelpunkte hingezogen. Die Richtungen, nach welchen diese Punkte gezogen werden, convergiren zwar, allein wegen der bedeutenden Größe der Entfernung kann man doch jeden schweren Körper als ein System von Angriffspunkten parallel wirkender Kräfte betrachten. Da man auch alle Punkte eines Körpers von gewöhnlicher Ausdehnung als gleich weit von dem Erdmittelpunkt entfernt annehmen darf, so können diese parallel wirkenden Kräfte auch alle als gleich angesehen werden.

Die Resultirende aller anziehenden Kräfte an einem Körper stellt dessen Gewicht vor. Eigentlich sollte man bei einer genauen Erwägung der Wirkungen der Schwerkraft dieselben als das Resultat einer gegenseitigen Anziehung zwischen der Erde und den Körpern auf ihr ansehen, ver-

Digitized by Google

möge welcher die Erde ebenso zu einem über ihr befindlichen Körper, als dieser zur Erde hinabgezogen wird. Allein auch dieses erläßt uns die unbedeutende Größe der beweglichen Theile der Erde gegen ihre ganze Masse.

Nach §. 374 befindet sich bei der Zusammensetzung paralleler Kräfte stets in der Richtung ihrer Resultirenden ein Punkt, durch welchen die Resultirende fortwährend hindurchgeht, wenn sich auch die Richtungen sämmtlicher Kräfte, jedoch ohne Störung des Parallelismus, um ihre Angriffspunkte drehen, der Mittelpunkt der parallelen Kräfte. Offenbar ist es aber einerlei, ob man die Richtungen der Kräfte sich um die Angriffspunkte drehen läßt, oder ob diese Richtungen ungeändert bleiben, und das System der Angriffspunkte ohne Störung ihrer relativen Lage gedreht wird. Da die Theile fester Körper stets dieselbe relative Lage zu einander beibehalten, so muß also bei ihnen der Mittelpunkt der parallelen Kräfte, oder der Punkt des Körpers, durch welchen die Resultirende geht, für alle Lagen des festen Körpers unveränderlich sein. Diesen Mittelpunkt der Schwerkräfte, welche einen festen Körper beherrschen, nennt man seinen *Schwerpunkt*.

§. 381. Man bestimmt den Schwerpunkt durch Versuche oder durch Rechnung. Im ersten Falle wird ein Körper ruhig an einem biegsamen Faden aufgehängt. Sein Schwerpunkt muß dann offenbar in der Verlängerung des Fadens liegen, weil der Charakter des Schwerpunktes ja gerade darin besteht, daß die Gesammtwirkung aller Kräfte, welche die Erde gegen einen Körper ausübt, durch ihn gehe, und demnach das ganze Gewicht dieses Körpers in diesem Punkte concentrirt sei, die übrigen Punkte aber als schwerlos angesehen werden können. *Wird ein Körper hinter einander an 2 verschiedenen, einander nicht grade entgegengesetzten Stellen an einem Faden befestigt aufgehängt, und in beiden Lagen die Richtung des verlängerten Fadens an ihm angemerkt, so ist der Durchschnittspunkt dieser beiden Richtungen der Schwerpunkt des Körpers.* Die Bestimmung des Schwerpunkts durch Versuche ist oft der Bestimmung desselben durch Rechnung vorzuziehen, weil letztere voraussetzt, daß die Körper durchaus gleich dicht seien, was doch in der Erfahrung selten stattfindet. Außerdem können bei Bestimmung durch Rechnung auch viele Fälle nur durch Anwendung der Integralrechnung gelöst werden. Einige der einfachsten und elementarsten Fälle sollen jedoch in den folgenden Paragraphen noch behandelt werden.

§. 382. *Der Schwerpunkt einer graden Linie, deren Punkte alle gleiche Schwere haben, liegt in der Mitte ihrer Länge.*

Wären nämlich nur die Endpunkte A und B schwer, so läge der Angriffspunkt der Resultirenden in der Mitte C. Denkt man sich nun auch noch die an A und B angrenzenden Punkte schwer, so sind diese wieder gleich weit von C entfernt, und da die Schwerkräfte, welche auf beide wirken, einander gleich sind, so liegt auch der Angriffspunkt ihrer Resultirenden in C. Auf gleiche Weise überzeugt man sich, daß der Angriffspunkt je zweier, von C gleich weit entfernter Punkte in C liegt, also ist C der Mittelpunkt der parallelen Kräfte, welche auf die Linie AB wirken.

§. 383. Der Schwerpunkt von dem Umfange eines Dreiecks soll gefunden werden.

Digitized by Google

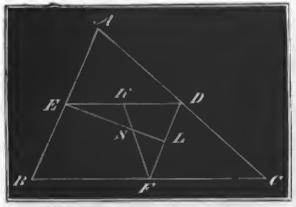


Fig. 111.

Man verbinde die Schwerpunkte D und E (Fig. 111.) zweier Seiten AC und AB durch die grade Linie DE, so wirken in D und E zwei parallele Kräfte, welche sich wie AC zu AB verhalten. Der Angriffspunkt K der Resultirenden hat demnach eine solche Lage, daß DK : EK = AB : AC ist (§. 374). Nun verbinde man K mit dem Schwerpunkt F der dritten Seite BC, so wird der Angriffspunkt der Resultirenden der in K wirkenden Kraft AB + AC, und der in F wirkenden Kraft BC in der Linie FK liegen. FK ist also eine Schwerelinie für den Umfang des Dreiecks. Unter Schwerelinie versteht man nämlich jede grade Linie, welche durch den Schwerpunkt geht. Ebenso findet man eine zweite Schwerelinie EL, wenn man den Punkt L so annimmt, daß DL : FL = BC : AC ist. Der Durchschnittspunkt S der beiden Schwerelinien ist der Schwerpunkt von dem Umfange des Dreiecks.

§. 384. Es soll der Schwerpunkt einer Dreiecksfläche gefunden werden.

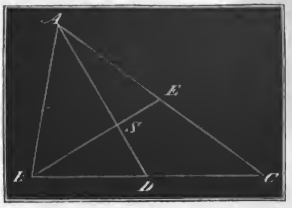


Fig. 112.

Man ziehe von der Spitze A des Dreiecks ABC (Fig. 112) die grade Linie AD nach der Mitte der gegenüberliegenden Seite BC, so ist AD eine Schwerelinie, denn sie halbirt alle im Dreieck mit BC parallel gezogenen Linien, und es muß demnach der Schwerpunkt der ganzen Fläche in ihr liegen. Halbirt man noch eine zweite Seite AC, und verbindet den Halbirungspunkt E mit B, so ist BE ebenfalls eine Schwerelinie des Dreiecks, folglich liegt der Schwerpunkt in dem Durchschnittspunkte S dieser beiden Linien.

§. 385. Die senkrechte Entfernung des Schwerpunkts eines Dreiecks von einer Seite desselben ist gleich dem dritten Theile der auf dieser Seite senkrechten Höhe.

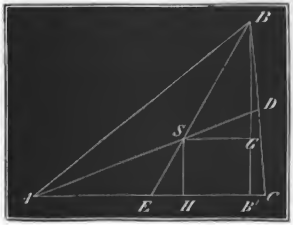


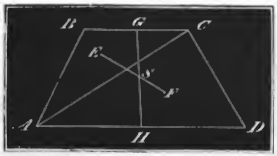
Fig. 113.

Nach der Geometrie ist bekannt, daß ES (Fig. 113) = $\frac{1}{3}$ EB und SD = $\frac{1}{3}$ AD ist. Man fälle BB' senkrecht auf AC, und ziehe SG || AC, so ist BB' : B'G = BE : ES, und da sich BE : ES wie 3 : 1 verhält, so ist auch B'G = $\frac{1}{3}$ BB', folglich, wenn SH senkrecht auf AC gezogen wird, auch SH = $\frac{1}{3}$ BB'. SH gibt aber die senkrechte Entfernung des Schwerpunkts von der Seite AC an.

§. 386. Der Schwerpunkt eines Paralleltrapezes soll gefunden werden.

Digitized by Google

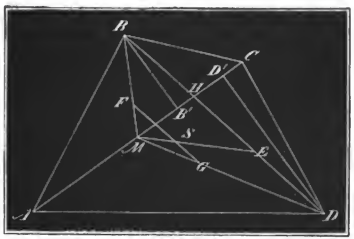
Fig. 114.



Die grade Linie GH (Fig. 114), welche die Mitten G und H der beiden parallelen Seiten AD und BC verbindet, halbirt alle mit AD oder BC parallele graden Linien, welche innerhalb des Trapezes liegen. GH ist also eine Schwerelinie. Um noch eine zweite Schwerelinie zu finden, ziehe man die Diagonale AC. Nun suche man den Schwerpunkt des Dreiecks ABC, er sei E, und den Schwerpunkt des Dreiecks ACD, er sei F. Der Schwerpunkt der ganzen Figur liegt demnach nothwendig auf der Verbindungslinie EF, also in dem Durchschnittspunkte S der beiden Schwerelinien EF und GH.

§. 387. Der Schwerpunkt eines beliebigen Vierecks soll gefunden werden.

Fig. 115.



Man ziehe die beiden Diagonalen AC und BD (Fig. 115), mache BE = DH, halbire AC in M, verbinde M mit E, und theile ME in 3 gleiche Theile, so ist der Theilpunkt S, welcher zunächst an der halbirten Diagonale AC liegt, der Schwerpunkt des Vierecks.

Man ziehe BM und DM, dann durch S die grade Linie FG parallel mit BD. Nun ist MS = $\frac{1}{3}$ ME, also MF = $\frac{1}{3}$ BM und MG = $\frac{1}{3}$ MD, und weil BM und DM von B und D nach der Mitte von AC gezogen sind, sind F und G die Schwerpunkte der Dreiecke ABC und ACD, folglich liegt der Schwerpunkt des Vierecks irgendwo in der Linie FG, und zwar muß er eine solche Lage in ihr haben, daß er sie in zwei Theile theilt, welche sich umgekehrt wie die Inhalte der beiden Dreiecke verhalten. Nun ist aber SF : SG = BE : ED = DH : BH, und wenn man BB′ und DD′ senkrecht auf AC zieht, ist △ ABC : △ ACD = BB′ : DD′. Es ist aber BB′ : DD′ = BH : DH, also SF : SG = △ ACD : △ ABC, und daher S der Schwerpunkt des Vierecks ABCD.

§. 388. Den Schwerpunkt einer dreiseitigen Pyramide zu finden, verbinde man den Schwerpunkt einer ihrer Seitenflächen mit der gegenüberliegenden Ecke durch eine grade Linie, und schneide auf dieser graden Linie von der Seitenfläche aus den vierten Theil derselben ab. Der so gefundene Theilungspunkt ist der Schwerpunkt der dreiseitigen Pyramide.

Digitized by Google

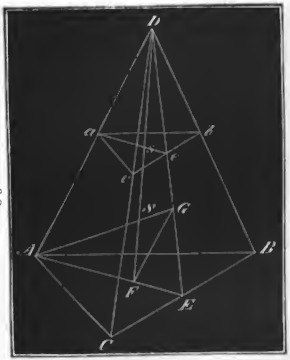


Fig. 116.

Man bestimme den Schwerpunkt F der Grundfläche ABC (Fig. 116), diesen verbinde man mit der gegenüberliegenden Ecke D der Pyramide, so ist DF eine Schwerelinie (denn legt man durch die Pyramide eine Ebene abc || ABC, zieht DE, welche die bc in e schneidet, und verbindet a mit e durch eine grade Linie, so ist, da bc || BC und BE = EC, auch be = ec, also ae eine Schwerelinie des Dreiecks abc; ae liegt aber mit DF in derselben Ebene DAE, und muß also die DF in einem Punkte s durchschneiden. Die Ebene DAE schneidet die parallelen Ebenen ABC und abc in AE und ae, also ist AE || ae und es : ea = EF : EA = 1 : 3, s muß demnach der Schwerpunkt des Dreiecks abc sein. Ebenso läßt sich auch von jeder anderen parallel mit ABC durch die Pyramide gelegten Ebene beweisen, daß ihr Schwerpunkt jedesmal in der Linie DF liegt). Ebenso wie DF gefunden wurde, construire man noch eine zweite Schwerelinie AG. AG und DF liegen aber beide in derselben Ebene ADE, daher schneiden sie sich, und ihr Durchschnittspunkt S muß demnach der Schwerpunkt der Pyramide sein. Man ziehe noch FG. Es ist EF : EA = EG : ED = 1 : 3. FG ist parallel mit AD, und daher △ FGS ∽ △ ASD, und FS : SD = FG : AD. FG : AD ist aber = EG : ED = 1 : 3, also auch FS : SD = 1 : 3, und FS : FS + SD = 1 : 1 + 3, oder FS : FD = 1 : 4. und FS = ¼ FD. Ebenso wird gezeigt, daß auch GS = ¼ AG.

§. 389. Der senkrechte Abstand des Schwerpunkts von jeder der Seitenflächen einer dreiseitigen Pyramide ist gleich ¼ der auf dieselbe Seitenfläche bezogenen Höhe.

Legt man nämlich durch den Schwerpunkt S eine Ebene parallel mit einer der Seitenflächen, so schneidet sie die auf dieser Seitenfläche senkrechte Höhe proportional der entsprechenden Schwerelinie, also in dem Verhältniß 1 : 4.

§. 390. Der Schwerpunkt einer jeden vielseitigen Pyramide, sowie eines jeden Kegels liegt in der vom Schwerpunkt der Grundfläche nach der Spitze gezogenen graden Linie um ¼ der Höhe von der Grundfläche entfernt.

Die grade Linie, welche den Schwerpunkt der Grundfläche mit der gegenüberliegenden Spitze verbindet, ist nothwendig eine Schwerelinie, da man wie bei der dreiseitigen Pyramide nachweisen kann, daß sie durch die Schwerpunkte aller mit der Grundfläche parallelen Durchschnittsflächen der vielseitigen Pyramide geht. Man zerlege die Grundfläche von ihrem Schwerpunkt aus in lauter Dreiecke, so zerfällt die Pyramide in ebenso viele dreiseitige Pyramiden, deren Grundflächen alle in derselben Ebene liegen, und die eine gemeinschaftliche Spitze, demnach alle mit der ganzen Pyramide eine gleiche Höhe haben. Da nun der Schwerpunkt einer

Digitized by Google

jeden der dreiseitigen Pyramiden um den vierten Theil der Höhe von der Grundfläche entfernt ist, so liegen die Schwerpunkte aller dieser Pyramiden in einer mit der Grundfläche parallelen Ebene, welche um ¼ der Höhe von dieser entfernt ist. Also liegt in dieser Ebene der Schwerpunkt der ganzen Pyramide, und zwar in demjenigen Punkte, in welchem die vorhin gefundene Schwerelinie diese Ebene trifft.

§. 391. Weil die Resultirende aller auf die verschiedenen Theile eines Körpers einwirkenden Schwerkräfte durch den Schwerpunkt geht, und die Resultirende dieselbe Richtung, wie diese einzelnen Schwerkräfte, haben, also lothrecht sein muß (§. 374), so folgt daraus, daß ein Körper, sobald er in irgend einem Punkte unterstützt ist, welcher in der durch den Schwerpunkt gehenden lothrechten Linie liegt, im Gleichgewichte sich befindet. Eine solche lothrechte Linie heißt daher auch, weil sie die Richtung angibt, in welcher der Schwerpunkt des Körpers nach dem Erdmittelpunkt hingezogen wird, die Richtungslinie der Schwere. Die Unterstützung des Körpers in dieser Linie kann nun eine dreifache sein, es kann nämlich der Unterstützungspunkt entweder über, in oder unter dem Schwerpunkte liegen. Erhält dann der Körper eine andere Lage, ohne daß sein Unterstützungspunkt sich ändert, so fragt es sich, ob in der neuen Lage noch der Unterstützungspunkt und der Schwerpunkt in dieselbe lothrechte Linie fallen, oder nicht. Im ersteren Falle wird der Körper auch in der neuen Lage in Ruhe bleiben, im letzteren nicht, weil eben der Schwerpunkt nicht mehr in der Richtungslinie der Schwere unterstützt ist, und folglich sein Bestreben, sich dem Mittelpunkte der Erde zu nähern, wieder wirksam wird. Diesem Bestreben ist aber offenbar erst dann Genüge geleistet, wenn der Schwerpunkt die möglichst tiefste Stelle einnimmt, und der Körper muß sich demnach so lange bewegen, bis sein Schwerpunkt in der möglichst tiefsten Stelle angekommen ist. War die Veränderung der Lage eines Körpers eine solche, daß durch dieselbe der Schwerpunkt höher zu liegen kam, so muß demnach der Körper, sich selbst überlassen, in seine alte Lage zurückkehren; war sie aber eine solche, durch welche der Schwerpunkt tiefer zu liegen kam, so kann er nicht in seine alte Lage zurückkehren, sondern seine Bewegung muß so lange andauern, bis eben der Schwerpunkt die möglichst tiefste Stelle erlangt hat. Man unterscheidet darnach 3 verschiedene Arten von Gleichgewicht, eine indifferentes, bei welchem der Körper in jeder Lage in Ruhe bleibt, ein stabiles (stabilis fest, sicher), bei welchem der Körper, wenn er aus seiner Lage gebracht wird, stets wieder in dieselbe zurückkehrt, und ein labiles (labilis, was leicht fällt), bei welchem er in diesem Falle ganz umschlägt. Das erste finden wir bei denjenigen Körpern, welche in ihrem Schwerpunkte selbst unterstützt sind, das zweite bei denen, die über dem Schwerpunkte unterstützt sind, also bei den aufgehängten Körpern, das dritte endlich bei denen, bei welchen der Unterstützungspunkt unter dem Schwerpunkte liegt. Daß auch in dem letzten Falle dem Körper eine gewisse Stabilität oder Standfestigkeit dadurch gegeben werden kann, daß man ihn nicht in einem Punkte, sondern in einer Fläche unterstützt, und daß diese Stabilität desto größer wird, je größer die Fläche ist, ist klar, da ja der Körper offenbar so lange nicht umstürzen kann, als noch die Richtungslinie der Schwere auf die Unterstützungsfläche trifft. Es

Digitized by Google

erklärt ſich hieraus, warum vierfüßige Thiere einen feſteren Stand haben, als die Menſchen, warum wir bei dem Fechten und Ringen die Beine aus einander breiten, warum die ſchiefen Thürme zu Piſa und Bologna nicht umſtürzen.

Dem Schiffscompaß mußte ungeachtet der vielfachen Schwankungen des Schiffes eine ſich immer gleich bleibende Lage gegeben werden, er mußte alſo ſtabiles Gleichgewicht erhalten. Durch das gewöhnliche Aufhängen war dies nicht zu bewerkſtelligen, weil der Aufhängepunkt ſelbſt die Schwankungen des Schiffes annehmen muß. Der Compaß iſt daher in 2 Ringen aufgehängt, von welchen der innere, der den Compaß trägt, ſich um 2 an dem äußeren Ringe befeſtigte Stifte drehen kann, während der äußere Ring ſelbſt ſich um 2 andere Stifte dreht, welche die erſteren Stifte rechtwinklig kreuzen, und an dem Kaſten, in welchem das Inſtrument ſich befindet, befeſtigt ſind. Auf demſelben Principe beruht die Rolllampe des Cardanus. Bei dem bergan rollenden Doppelkegel ſteigt der Schwerpunkt nicht, wie es auf den erſten Anblick ſcheinen könnte, ſondern er fällt. Die Erſcheinungen des chineſiſchen Burzelmännchens werden dadurch hervorgebracht, daß durch die Bewegung des in der inneren Höhlung befindlichen Queckſilbers der Schwerpunkt immerfort verändert wird. Auch der dem Scheine nach auffallende Verſuch, daß man eine kleine Geldmünze auf einer feinen Spitze balanciren kann, wenn man ſie in die Mitte eines Korkes ſteckt, in den man außerdem an beiden Enden 2 ſchief abwärts gerichtete Gabeln geſteckt hat, verliert ſein Auffallendes, wenn man erwägt, daß durch die Gabeln der Schwerpunkt ſo weit herabgedrückt iſt, daß das ganze Syſtem, welches ſcheinbar von Unten unterſtützt iſt, eigentlich einem aufgehängten Körper zu vergleichen iſt, und ſich alſo in ſtabilem Gleichgewicht befindet.

C. Gleichgewicht der Kräfte an Maſchinen.

§. 392. Eine Vorrichtung, vermittelſt welcher eine Kraft auf einen außer ihrer Richtung liegenden Punkt wirkt, heißt eine Maſchine. Es liegt in der Natur der Sache, daß der Bewegung des Punktes, auf welchen die Kraft mittelſt der Maſchine wirken ſoll, ein Hinderniß entgegenſtehe, weil ſonſt kein Grund vorhanden wäre, die Maſchine anzuwenden. Dieſes Hinderniß läßt ſich als eine Gegenkraft betrachten, welche in Bezug auf erſtere, die hier vorzugsweiſe Kraft heißt, die Laſt genannt wird. Es kommen daher bei jeder Maſchine wenigſtens dieſe zwei Kräfte in Betrachtung. Um einzuſehen, wie die Maſchine zwiſchen Kraft und Laſt vermittelt, denke man ſich die Kraft ſo gewählt, daß ſie der Laſt das Gleichgewicht hält. Das Verhältniß, in welchem die Größe der Kraft zu jener der Laſt in dieſem Falle ſteht, heißt das ſtatiſche Verhältniß. Aus dem Begriff einer Maſchine geht hervor, daß die Richtungen der Kraft und Laſt einander nicht grade entgegengeſetzt ſind. Soll nun zwiſchen beiden Kräften Gleichgewicht herrſchen, ſo muß ihre Reſultirende durch einen unbeweglichen Punkt gehen, oder auf einer unbeweglichen Fläche ſenkrecht ſtehen, und dadurch aufgehoben werden. Ein ſolcher unbeweglicher Punkt heißt Unterſtützungspunkt.

Digitized by Google

§. 393. Eine Maschine, von welcher kein Bestandtheil selbst wieder eine Maschine ist, heißt einfach, sonst aber zusammengesetzt. Die einfachen Maschinen zerfallen in zwei Klassen, nämlich in solche, bei welchen die Resultirende der wirkenden Kräfte durch einen fixen Punkt, und solche, bei welchen dieselbe durch eine unbewegliche Fläche aufgehoben wird. Zu den ersteren gehören der Hebel, das Wellrad und die Rolle, zu den letzteren die geneigte Ebene, die Schraube und der Keil. Alle sechs umfaßt man auch unter dem Namen der mechanischen Potenzen.

§. 394. Ein Hebel ist eine unbiegsame Stange oder Linie, welche um einen festen Punkt, den Unterstützungspunkt, beweglich ist, außer welchem die Kraft und die Last angebracht sind. Die Entfernungen der Angriffspunkte von dem Unterstützungspunkte heißen die Hebelarme. Wird die Stange schwerlos gedacht, so heißt der Hebel ein mathematischer Hebel, ist sie aber schwer, ein physischer Hebel. Liegen die Angriffspunkte und der Unterstützungspunkt in einer graden Linie, so ist der Hebel ein gradliniger, sonst ein Winkelhebel. Liegt der Unterstützungspunkt zwischen den Angriffspunkten der Kraft und der Last, so heißt der Hebel zweiarmig, sonst einarmig. Die einarmigen Hebel theilt man wieder ein in Traghebel und Wurfhebel, je nachdem der Hebelarm der Last oder derjenige der Kraft der kleinere ist *).

§. 395. Bei jedem mathematischen Hebel, er sei ein- oder zweiarmig, gradlinig oder ein Winkelhebel, stehen Kraft und Last im Gleichgewicht, wenn sie sich umgekehrt verhalten wie die Senkrechten, welche von dem Unterstützungspunkt auf die Richtungen der Kräfte gezogen sind, d. h. wenn die Momente der Kraft und der Last in Beziehung auf den Unterstützungspunkt einander gleich sind (§. 376).

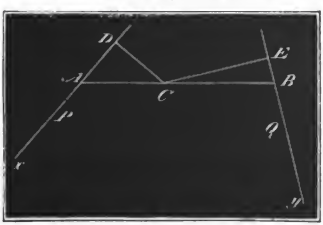


Fig. 117.

ACB (Fig. 117) sei der Hebel, C der Unterstützungspunkt, Ax die Richtung der Kraft P, By diejenige der Last Q, CD und CE seien die Senkrechten von dem Unterstützungspunkt C auf die Richtungen von P und Q, und es sei $P : Q = CE : CD$ oder $P \times CD = Q \times CE$, so geht nach §. 377 die Resultirende beider Kräfte durch den Unterstützungspunkt C, und es kann demnach keine Bewegung erfolgen (§. 392).

§. 396. Aus dem vorhergehenden Paragraphen folgt, daß, wenn Kraft und Last parallel auf einen gradlinigen Hebel wir-

*) Die Namen Traghebel und Wurfhebel kommen daher, weil, wie aus den folgenden Paragraphen erhellt, man mit den ersteren eine große Masse mit einer kleineren Kraft heben kann, während man mit den letzteren nur eine geringere Last zu heben im Stande ist, aber diese auch durch einen größeren Bogen führt, als der ist, welchen die Kraft durchläuft. Wenn daher die Last von der bewegenden Hebelstange losgelöst wird, so geht sie mit einer größeren Geschwindigkeit fort, als diejenige ist, welche ihr die Kraft hätte unmittelbar geben können.

Digitized by Google

ken, sie dann im Gleichgewicht stehen, wenn sie sich umgekehrt wie die Hebelarme verhalten.

In diesem Falle werden nämlich die Dreiecke ACD und CEB (Fig. 117) ähnlich, und es verhält sich dann CD : CE = CA : CB.

§. 397. In §. 395 ist, wo von Gleichheit der Momente die Rede ist, die Größe dieser Momente absolut genommen (d. h. ohne Rücksicht auf die Vorzeichen) verstanden. Nach dem strengen analytischen Begriff von positiven und negativen Größen müssen wir aber diejenigen Kräfte positiv nennen, welche nach der einen Richtung, und diejenigen negativ, welche nach der entgegengesetzten Richtung wirken; und ebenso müssen die von einem Punkte an gerechneten Entfernungen nach der einen Seite positiv, nach der andern negativ genannt werden. Mit Rücksicht hierauf wird beim Gleichgewicht am Hebel das Moment der Kraft dem Momente der Last nicht nur gleich, sondern auch stets entgegengesetzt sein, so daß man eigentlich streng genommen sagen muß: das Gleichgewicht findet statt, wenn die Summe der Momente = 0 ist.

§. 398. Der physische Hebel kann in einen mathematischen verwandelt werden, wenn man sein ganzes Gewicht in seinem Schwerpunkte vereint annimmt, und ihn dann als schwerlos behandelt. Für den Stand des Gleichgewichtes muß das Moment dieses Gewichts in Beziehung auf den Unterstützungspunkt (§. 376) zu dem Momente der Kraft addirt werden, 1) wenn der Schwerpunkt auf die Seite der Kraft fällt, und diese abwärts wirkt, oder 2) wenn der Schwerpunkt auf die Seite der Last fällt, und diese aufwärts wirkt. In den übrigen Fällen muß dieses Moment zu jenem der Last addirt werden.

§. 399. Der Hebel findet vielfache Anwendung, z. B. in den Brecheisen, Schaufeln, Zangen, Scheeren, Hebladen, Hammerwerken, Rudern u. s. w. Für den Physiker ist er aber noch besonders wichtig deßwegen, weil die Wage auf demselben beruht. Man unterscheidet zwei Arten von Wagen, die gemeine Wage und die Schnellwage. Für die Physik ist besonders die gemeine Wage wichtig. Sie besteht aus dem Wagebalken, der Scheere, der Zunge und den Schalen. Der Wagebalken liegt mittelst eines in der Mitte desselben zu beiden Seiten hervorragenden, nach Unten in eine Scheide sich endigenden Zapfens auf den Lagern oder Pfannen der Scheere. Diese Schneide ist die Drehungsare des Balkens. Der Wagebalken soll, wie er auch innerhalb der Grenzen seines Tragvermögens belastet wird, eine stabile Gleichgewichtslage (§. 391) annehmen, und zwar eine horizontale bei gleicher, eine geneigte bei ungleicher Belastung der Schalen, und in letzterem Falle soll die Abweichung von der horizontalen Lage, der Ausschlag genannt, um so größer werden, je größer der Unterschied der Lasten ist, welche in beiden Schalen liegen. Die Stabilität des Balkens ohne Schalen erheischt, daß sein Schwerpunkt tiefer liege, als seine Drehungsare, die Stabilität des Balkens mit belasteten Schalen, daß die Drehungsare über der Verbindungslinie der Aufhängepunkte der Schalen, welche Linie die Längenare des Balkens heißt, sich befinde. Zur horizontalen Ruhelage des unbelasteten Balkens ist erforderlich, daß die Verbindungslinie der Drehungsare mit seinem Schwerpunkte die Längenare senkrecht durchschneide. Soll die horizontale Lage des Balkens auch noch bei belasteten Schalen stattfinden, so muß der Durchschnittspunkt vorge-

Digitized by Google

nannter Linien zugleich der Halbirungspunkt der Längenare sejn. Dieser Halbirungspunkt heißt der Mittelpunkt des Wagebalkens. In diesem Falle ist der Wagebalken gleicharmig. Die Zunge ist diejenige Grade, welche durch die Drehungsare, den Mittelpunkt und den Schwerpunkt des Wagebalkens geht.

§. 400. Je kleiner der Abstand des Mittelpunkts und des Schwerpunktes von der Drehungsare in Vergleich mit der Länge des Wagebalkens, und je geringer das Gewicht des Wagebalkens und der Belastung ist, ein desto geringerer Unterschied in der Belastung beider Schalen reicht hin, einen bestimmten Ausschlagwinkel hervorzubringen, und desto empfindlicher ist daher die Wage (man schätzt die Empfindlichkeit einer Wage nach dem aliquoten Theile der größten, ihrem Tragvermögen angemessenen Belastung, den sie noch anzuzeigen vermag. Eine gute Wage soll wenigstens $\frac{1}{10000}$ von dem Maximum der Belastung anzeigen. Ramden's berühmte Wage gab bei einer Belastung von 10 Pfund noch 0,006 Gran, also $\frac{1}{133333}$ der Belastung an. Fortin's Wagen zeigen bei vier Pfund Belastung noch $\frac{1}{50}$ Gran, mithin $\frac{1}{153600}$ der Last an).

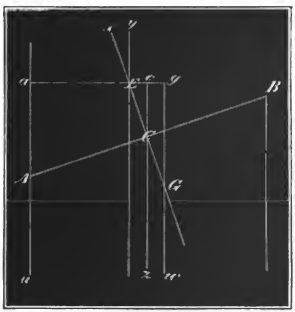


Fig. 118.

Es sei AB (Fig. 118) die Längenare des Wagebalkens in einer durch ungleiche Belastung der Wagschalen hervorgebrachten schiefen Gleichgewichtslage, C der Mittelpunkt, G der Schwerpunkt, E die Drehungsare, also Gx die Richtung der Zunge und ∢ xEy der Ausschlag. Das Gewicht des Wagebalkens sei Q, jede Schale habe das Gewicht S, und sei mit dem Gewichte P belastet, überdieß aber sei in der Schale A das Gewicht p zugelegt. Man kann das Gewicht des Wagebalkens in seinem Schwerpunkte, und die gleichen Gewichte der Schalen und Belastungen in dem Mittelpunkte concentrirt denken. Es wird also die Gleichgewichtslage des Wagebalkens durch die drei Kräfte p, 2 (S + P) und Q hervorgebracht, welche in den Punkten A, C und G nach den verticalen Richtungen Au, Cz und Gw wirken. Das Gewicht p läßt sich nun aus zwei Theilen p' und p'' zusammengesetzt betrachten, von welchen der erste der Kraft in C, der zweite der Kraft in G das Gleichgewicht hält. Zieht man nun durch den Unterstützungspunkt E eine Horizontalebene, welche Au, Cz und Gw in a. c und g begegnet, so hat man nach §. 395 $p' \times Ea = 2 (S + P) \times Ec$ und $p'' \times Ea = Q \times Eg$, also $(p' + p'') Ea = 2 (S + P) \times Ec + Q \times Eg$. Ea ist aber $= ac - Ec$, also $p (ac - Ec) = 2 (S + P) \times Ec + Q \times Eg$. Diese Gleichung zeigt, daß, wenn unter den Größen ac, Ec, Eg, S + P und Q alle bis auf eine ungeändert bleiben, zur Verringerung von p nothwendig entweder ac vergrößert, oder eine der übrigen vier Größen verringert werden muß. Für denselben Ausschlagwinkel ändern sich aber ac, Ec und Eg in demselben Verhältniß wie AC, EC und

Digitized by Google

EG. Es wird also zur Hervorbringung von einerlei Ausschlagwinkel ein kleineres p genügen, wenn entweder AC wächst, oder EC, EG, S + P, Q abnehmen.

§. 401. Da die Mittelkraft aller auf einen Hebel wirkenden parallelen Kräfte durch den Unterstützungspunkt geht, und mit der gemeinschaftlichen Richtung der Seitenkräfte parallel ist, der Unterstützungspunkt aber wegen seiner Festigkeit die Wirkung dieser Mittelkraft aufhebt, so hat derselbe einen Druck auszuhalten, welcher der Summe der parallelen Kräfte gleich ist (vergl. §. 374 und §. 392).

§. 402. Wirken die Kräfte nach verschiedenen Richtungen, so geht wieder die Mittelkraft aller Kräfte durch den Unterstützungspunkt (§. 392). Der Unterstützungspunkt hebt wegen seiner Festigkeit die Wirkung der Mittelkraft auf, und erleidet demnach einen Druck, welcher durch die Größe dieser Mittelkraft bestimmt wird. Es soll jetzt die Größe dieses Druckes oder der Mittelkraft für den Fall gefunden werden, daß die Kräfte nach verschiedenen Richtungen wirken.

Gesetzt, es wirkten die Kräfte P_1, P_2, P_3 u. s. w. auf den Hebel, und ihre Richtungen bildeten mit demselben beziehlich die Winkel α_1, α_2, α_3 u. s. w., so läßt sich jede Kraft, z. B. P_1, in zwei Seitenkräfte P'_1 und P''_1 zerlegen, von welchen die erste in die Richtung des Hebels fällt, die andere darauf senkrecht ist, und es wird $P'_1 = P_1 \times \cos.\alpha_1$, $P_1'' = P_1 \times \sin.\alpha_1$, $P_2' = P_2 \times \cos.\alpha_2$ und $P_2'' = P_2 \times \sin.\alpha_2$ u. s. w. sein. In der Richtung des Hebelarmes wirken also auf den Unterstützungspunkt die Kräfte P_1', P_2', P_3' u. s. w., und da sie nach einerlei Richtung wirken, so ist ihre Resultirende $D' = P_1' + P_2' + P_3' + \ldots = P_1 \times \cos.\alpha_1 + P_2 \times \cos.\alpha_2 + P_3 \times \cos.\alpha_3 + \ldots$ und wirkt ebenfalls in der Richtung des Hebelarmes. Senkrecht auf den Hebelarm aber wirken auf den Unterstützungspunkt die Kräfte P_1'', P_2'', P_3'' u. s. w., und da sie ebenfalls nach einerlei Richtung wirken, so ist ihre Resultirende $D'' = P_1'' + P_2'' + P_3'' + \ldots = P_1 \times \sin.\alpha_1 + P_2 \times \sin.\alpha_2 + P_3 \times \sin.\alpha_3 + \ldots$, und wirkt ebenfalls senkrecht auf den Hebelarm. Wir können uns also jetzt vorstellen, daß statt der gegebenen Kräfte auf den Unterstützungspunkt eine Kraft D' in der Richtung des Hebelarmes, und eine zweite Kraft D'' senkrecht auf denselben einwirkt. Setzen wir auch diese zwei Kräfte zu einer einzigen Kraft D zusammen, so muß, weil das Kräfteparallelogramm rechtwinklig ist, $D^2 = D'^2 + D''^2$ oder $D = \sqrt{D'^2 + D''^2} =$

$\sqrt{(P_1 \times \cos.\alpha_1 + P_2 \times \cos.\alpha_2 + P_3 \times \cos.\alpha_3 \ldots)^2 + (P_1 \times \sin.\alpha_1 + P_2 \times \sin.\alpha_2 + P_3 \times \sin.\alpha_3 + \ldots.)^2}$ sein, wodurch die Aufgabe gelöst ist.

§. 403 Das Wellrad ist ein um seine Are beweglicher Cylinder mit einem Rade, dessen Are mit jener des Cylinders zusammenfällt, und zugleich auf der Ebene des Rades senkrecht steht. Die Kraft wirkt am Umfange des Rades, die Last am Umfange des Cylinders. Denkt man sich die Last in die Ebene des Rades versetzt, so wird dadurch an dem Erfolge der Kraft Nichts geändert, weil Welle und Rad mit einander unveränderlich verbunden sind (§. 362).

Digitized by Google

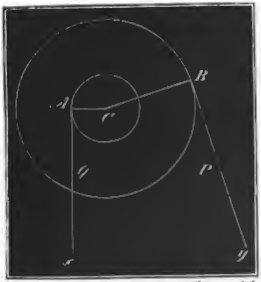


Fig. 119.

§. 404. Aus der Betrachtungsweise des vorigen Paragraphen ist ersichtlich, daß Fig. 119 als ein Querschnitt der Maschine angesehen werden kann, und daß sie sich auf einen Hebel zurückführen läßt, dessen Unterstützungspunkt C in der Axe des Rades liegt, während in A die Last Q, und in B die Kraft P wirkt. Man hat daher für den Zustand des Gleichgewichts die Proportion $P : Q = AC : BC$, d. h. die Kraft verhält sich zur Last, wie der Halbmesser der Welle zu dem Halbmesser des Rades.

§. 405. Der Druck, welchen der Punkt C (Fig. 119) auszuhalten hat, ist der Verbindungslinie der Punkte A und B proportionirt, so daß derselbe sich ändert, wenn A und B an andere Stellen des Umfangs der Welle und des Rades fallen, ohne daß deßhalb an dem statischen Verhältniß der Kraft und Last eine Veränderung vor sich geht.

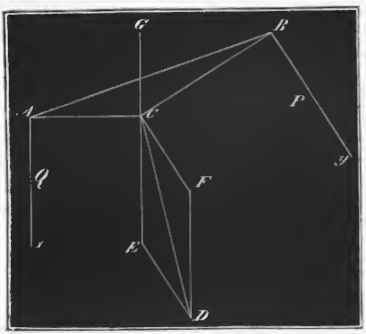


Fig. 120.

Q greife statt in A (Fig. 120) in C an. Es sei also $CE \parallel Ax$, und $CE = Q$. Eben so greife P statt in B in C an, und es sei $By \parallel CF$ und $CF = P$. Man construire das Kräfteparallelogramm CFDE, so ist CD die Resultirende von P und Q, und bestimmt den Druck auf C. Nun verhält sich $Q : P = CB : AC$, also auch $CE : CF = CB : AC$ oder $CE : ED = CB : AC$. Ferner ist $\sphericalangle ACB = \sphericalangle GCF$, weil jeder aus einem Rechten und dem Winkel GCB besteht; $\sphericalangle GCF$ ist aber auch $= \sphericalangle CED$, also ist auch $\sphericalangle ACB = \sphericalangle CED$. Die Dreiecke ACB und CED sind also ähnlich, und bleiben es auch, der Winkel ACB mag sich ändern, wie er wolle. Es wird also immer $AC : ED = AB : CD$ sein. Nun bleibt das Verhältniß $AC : ED$ immer unverändert, folglich muß auch immer AB der CD, d. h. dem Drucke auf C, proportionirt sein, und der Druck muß in demselben Verhältniß wachsen, wie AB wächst.

§. 406. Hat bei einem Rad an der Welle die Welle eine horizontale Lage, so heißt die Maschine ein Haspel, steht aber die Welle vertical, eine Winde oder ein Göpel. Sie heißt Seilrad, wenn die Kraft an einem Seile wirkt, welches um die Peripherie des Rades gelegt ist, Kreuzhaspel, wenn statt des Rades bloß einzelne Stäbe kreuzweise durch die Axe der Welle gesteckt sind, mittelst deren die Welle umgedreht wird, Hornrad, wenn am Umfange des Rades in der Richtung der Radien desselben kurze Sprossen angebracht sind, Spillrad, wenn diese Sprossen mit der Axe der Welle parallel sind, Hornhaspel, wenn statt des Rades

Digitized by Google

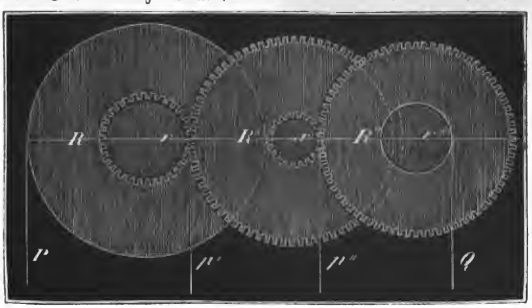
an den Zapfen der Welle Handgriffe oder Kurbeln angebracht sind, Laufrad, wenn statt des Rades eine hohle Trommel auf der Welle sitzt, auf deren innerem Umfange Menschen oder Thiere durch ihr Gewicht eine Umdrehung bewirken. Die Tretscheibe besteht aus einer schief stehenden Welle, an welche eine zur Are der Welle senkrechte Scheibe befestigt ist, auf welcher Menschen oder Thiere von dem niedrigsten Theile zu dem höchsten emporschreiten, und dadurch eine Umdrehung brwirken.

§. 407. Ein Räderwerk ist eine Verbindung von mehreren Radwellen, welche so unter einander zusammenhangen, daß eine Drehung eines einzelnen Rades auch allen übrigen mitgetheilt wird. Die Verbindung der Räder unter einander kann auf verschiedene Weise erreicht werden. Das einfachste Mittel ist, daß ein Seil ohne Ende über den Umfang jedes Rades und zugleich um die Welle des nächstfolgenden Rades gespannt wird. Eine andere gewöhnliche Verbindungsweise der Räder sind Zähne, welche am Umfange angebracht sind. Die Zähne des einen Rades greifen in diejenigen des andern ein, und schieben bei ihrer eigenen Bewegung das andere Rad mit fort. Diese Räder heißen gezahnte Räder. Befinden sich auf derselben Welle 2 ungleich große gezahnte Räder, so heißt das größere vorzugsweise Rad, das kleinere Getriebe. Die Zähne der Getriebe heißen Triebstöcke. Die Triebstöcke haben entweder die Gestalt der Zähne oder es sind auf der Oberfläche eines Cylinders eingeschnittene und mit dessen Are parallel laufende Furchen, oder endlich grade Stäbe, Spillen genannt, welche die Umfänge zweier kreisförmigen und parallelen Scheiben mit einander verbinden; letztere sind in einem gewissen Abstand von einander auf einer ihre Mittelpunkte verbindenden Welle befestigt. Ein solches Getriebe heißt auch ein Drilling.

Es gibt 3 Arten von Rädern, nämlich 1) das Stirnrad, bei welchem die Zähne in der Ebene des Rades, in der Verlängerung der Radien stehen, 2) das Kronrad oder Kammrad, bei welchem die Zähne senkrecht auf der Ebene des Rades stehen, und 3) das conische Rad, bei welchem die Zähne schief stehen, so daß sie zusammen einen abgestumpften Kegel bilden.

§. 408. An einem Räderwerk verhält sich im Zustande des Gleichgewichts die Kraft zur Last, wie das Produkt der Radien aller Getriebe zu dem Produkte der Radien aller Räder.

Fig. 121.



Digitized by Google

Um die Bedingungen des Gleichgewichts an Räderwerken zu finden, betrachtet man jedes Rad mit der damit verbundenen Welle, oder dem Getriebe, als eine Radwelle. Nach §. 404 muß sich an Fig. 121

$$P : p' = r : R$$
$$p' : p'' = r' : R'$$
$$p'' : Q = r'' : R'' \text{ verhalten.}$$

also ist auch $P \cdot p' \cdot p'' : p' \cdot p'' \cdot Q = r \cdot r' \cdot r'' : R \cdot R' \cdot R''$, und wenn man die Glieder des vorderen Verhältnisses durch $p' \cdot p''$ dividirt,

$$P : Q = r \cdot r' \cdot r'' : R \cdot R' \cdot R''.$$

§. 409. Die Rolle ist eine kreisrunde, an ihrem Umfange mit einer Rinne versehene Scheibe. Ist sie nur um ihre Are beweglich, so heißt sie eine fixe oder feste Rolle. Läßt sie sich aber nicht bloß um ihre Are drehen, sondern auch sammt derselben bewegen, so nennt man sie eine bewegliche oder lose Rolle. Dreht die Are einer Rolle sich nicht zugleich mit der Rolle um, so heißt sie Bolzen; ist dagegen die Are fest mit der Rolle verbunden, so daß sie sich mit dieser zugleich umdrehen muß, so heißt sie Zapfen. Der Zapfen dreht sich in Pfannen oder Zapfenlagern, welche zu beiden Seiten der Rolle angebracht sind. Bei der festen Rolle bleiben die Zapfenlager bei der Umdrehung der Rolle in Ruhe, bei der beweglichen Rolle dagegen kommen sie zugleich mit in eine fortschreitende Bewegung. Die lose Rolle steckt außerdem in einer gabelförmigen Hülse oder Gabel, welche den Bolzen oder Zapfen als Unterlage dient, und woran die Last befestigt wird.

§. 410. Bei der festen Rolle ist für den Zustand des Gleichgewichts die Kraft gleich der Last.

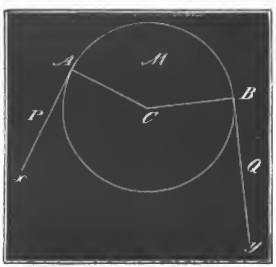


Fig. 122.

Denn wenn M (Fig. 122) eine feste Rolle, AB ein von einem absolut biegsamen Stricke umfaßtes Bogenstück, C den Mittelpunkt der Rolle, P und Q Kräfte vorstellen, welche nach Ax und By wirken, so daß Ax und By Tangenten der Scheibe sind, und wenn C ein fixer Punkt ist, so läßt sich ACB als Hebel ansehen, und es findet demnach Gleichgewicht statt, wenn $P \times AC = Q \times BC$ ist. Da nun $CB = AC$, so muß auch $P = Q$ sein.

Da also bei der festen Rolle gleiche Kräfte einander das Gleichgewicht halten, so kann man Nichts an Kraft gewinnen, und diese Rolle kann daher nur dazu dienen, der Kraft eine andere Richtung zu geben. Aus diesem Grunde wird sie auch Leitrolle genannt.

§. 411. Bei der beweglichen Rolle verhält sich für den Zustand des Gleichgewichts die Kraft zur Last, wie der Halbmesser der Rolle zur Sehne des von dem Stricke umfaßten Bogens.

Digitized by Google

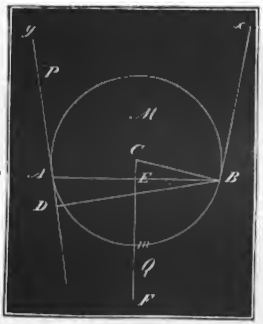


Fig. 123.

M (Fig. 123) sei eine bewegliche Rolle, das Seil xBAy sei in x befestigt, in der Richtung Ay wirke die Kraft P, in der Richtung CF die Last Q. Nun läßt sich M offenbar als ein einarmiger Hebel betrachten, dessen Drehpunkt B ist. Für den Zustand des Gleichgewichts muß also P : Q = BE : BD sein. Es ist aber △ ABD ∽ △ BEC, denn ∢D = ∢E = 1 R., und ∢BAD = ∢BCE (∢BAD wird gebildet von einer Sehne und einer Tangente, und ist daher = ½ arc. AB = arc. Bm und ∢BCE ist auch = arc. Bm). Folglich verhält sich BE : BD = BC : AB, und P : Q = BC : AB.

So lange die Sehne AB größer, als der Radius BC, d. h. so lange der umfaßte Bogen größer ist, als 60° und kleiner, als 300°, findet Gewinn an Kraft statt; sobald aber dieser Bogen kleiner, als 60°, und größer, als 300° wird, herrscht das Gegentheil. AB wird aber am größten, wenn es durch den Mittelpunkt geht, und Durchmesser wird. Dann ist BC : AB = 1 : 2. Dieser Fall findet statt, wenn P und Q nach parallelen Richtungen wirken, oder wenn Ay || CF ist.

§. 412. Aus den §§. 410 und 411 lassen sich nun leicht die Bedingungen des Gleichgewichts an allen möglichen Verbindungen loser und fester Rollen herleiten. Ein Rollenzug ist eine solche Verbindung, bei welcher jede Rolle in einer Hülse steckt, und von einem Seile getragen wird, dessen eines Ende an einem unbeweglichen Körper, das andere an der Hülse der nächstfolgenden Rolle befestigt ist. An der Hülse der ersten oder untersten Rolle hängt die Last, von der obersten oder letzten geht das Seil über eine feste Rolle, und an diesem Ende wirkt die Kraft, welche die Last im Gleichgewichte halten soll. Wir beschränken uns hier auf den in der Technik am häufigsten vorkommenden Fall, nämlich auf den Fall, wenn alle Seile vertical, also auch mit einander parallel sind. Für diese Voraussetzung gilt nämlich der Lehrsatz des folgenden Paragraphen.

§. 413. Man findet für einen Rollenzug die zum Gleichgewicht nöthige Kraft, wenn man die Last durch diejenige Potenz von 2 dividirt, deren Exponent gleich der Anzahl loser Rollen ist.

Digitized by Google

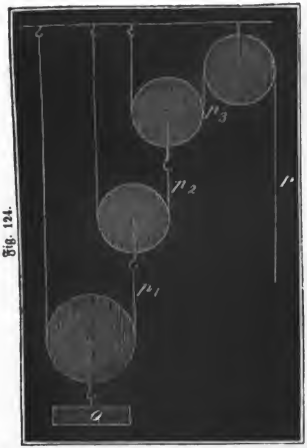


Fig. 124.

Es seien (Fig. 124) p_1, p_2, p_3 u. s. f. die Spannungen der einzelnen auf einander folgenden Seile. Man kann nun jede derselben einmal als Kraft betrachten, welche die zugehörige Rolle im Gleichgewicht hält, dann aber auch als Last, welche an der Hülse der nächstfolgenden Rolle angebracht ist. Nun ist nach §. 411 $p_1 : Q = 1 : 2$, $p_2 : p_1 = 1 : 2$, $p_3 : p_2 = 1 : 2$ u. s. f., so daß für n lose Rollen wir n solcher Proportionen haben, deren letzte $p_n : p_{n-1} = 1 : 2$ ist. Durch Zusammensetzung dieser Proportionen erhält man $p_n : Q = 1 : 2^n$, und da p_n nach §. 410 $= P$ ist, auch $P : Q = 1 : 2^n$, also $2^n \times P = Q$ und $P = \frac{Q}{2^n}$.

§. 414. Befinden sich mehrere Rollen in einer gemeinschaftlichen Hülse neben oder über einander, so heißt die Verbindung ein Kloben oder eine Flasche. Zwei durch ein Seil mit einander verbundene Flaschen, von welchen die eine an einem unbeweglichen Körper aufgehängt ist, nennt man einen Flaschenzug. Bisweilen nennt man auch die Rollenzüge Potenzflaschenzüge, dann heißen die eben beschriebenen Flaschenzüge gemeine Flaschenzüge.

Bei den gemeinen Flaschenzügen findet man die zum Gleichgewichte erforderliche Kraft, wenn man die Last durch die doppelte Zahl der beweglichen Rollen dividirt. Hier muß sich nämlich die Last Q nothwendig auf alle Theile des Seiles, welches die beiden Flaschen mit einander verbindet, gleichmäßig vertheilen, und folglich die Kraft P demjenigen Theile der Last gleichkommen, welcher auf das Seilende wirkt, an dessen Verlängerung die Kraft angebracht wird. Ist daher n die Anzahl der Seilenden (dasjenige, auf welches die Kraft wirkt, nicht mitgerechnet), so ist $P = \frac{Q}{n}$. Da aber auf jede lose Rolle, d. h. auf jede Rolle der unteren, beweglichen Flasche, zwei Seilenden kommen, so hat man ebenso, wenn m die Anzahl der losen Rollen im Flaschenzuge bezeichnet, $P = \frac{Q}{2m}$.

Durch die Vergleichung mit dem vorhergehenden Paragraphen ergibt sich, daß bei dem Potenzflaschenzug mehr Kraft gespart wird, als bei dem gemeinen, und zwar im Verhältniß von $2^n : 2n$, wenn n die Anzahl der losen Rollen ist. Eine einfache Betrachtung zeigt aber auch, daß bei beiden Flaschenzügen der zurückgelegte Weg der Kraft denjenigen der Last in demselben Verhältniß übertrifft. Deßwegen wird der Potenzflaschenzug nur da gebraucht, wo man schon durch geringe Hebung der Last bestimmte Zwecke

Digitized by Google

erreicht, z. B. auf Seeschiffen; überall aber, wo Lasten auf größere Höhen gehoben werden sollen, wird der gemeine Flaschenzug gebraucht.

§. 415. Wir gehen nun zur zweiten Classe der einfachen Maschinen über, nämlich zu denjenigen, bei welchen im Zustande des Gleichgewichts die Resultirende der wirkenden Kräfte durch eine unbewegliche Fläche aufgehoben wird. Wie sich in der ersten Classe Wellrad und Rolle auf den Hebel zurückführen ließen, so werden in dieser Classe Schraube und Keil auf die geneigte Ebene zurückgeführt werden können.

Unter einer geneigten oder schiefen Ebene versteht man jede Ebene, welche mit der Horizontalebene einen spitzen Winkel macht.

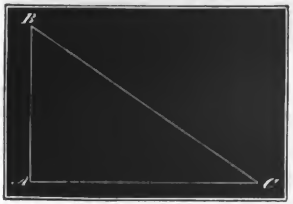


Fig. 125.

Ist C (Fig. 125) ein Punkt der Durchschnittslinie der geneigten Ebene mit einer horizontalen, BC in ersterer, AC in letzterer auf diese Durchschnittslinie senkrecht, und BAC ein rechter Winkel, also BA vertical, so heißt AC die Basis, AB die Höhe, BC die Länge und ACB der Neigungswinkel der schiefen Ebene.

§. 416. Bei der schiefen Ebene verhält sich im Zustande des Gleichgewichts allgemein die Kraft zur Last, wie der Sinus des Neigungswinkels der schiefen Ebene zum Cosinus desjenigen Winkels, welcher gleich ist dem Unterschiede zwischen dem Winkel, welchen die Richtung der Kraft mit der horizontalen Richtung macht, und dem Neigungswinkel der schiefen Ebene.

Fig. 126.

Es sei S (Fig. 126) der Schwerpunkt eines auf der schiefen Ebene liegenden Körpers, dessen Gewicht $Q = Sa$ als eine verticale im Schwerpunkte angebrachte Kraft wirkt. In der Richtung Sb, welche mit der horizontalen Sz den Winkel $bSz = \beta$ bildet, wirke eine Kraft $P = Sb$ ebenfalls im Schwerpunkte. Man zerlege sowohl die Last Q, als die Kraft P in zwei Seitenkräfte q und q', und p und p', so nämlich, daß q und p mit der Richtung AC der schiefen Ebene parallel, q' und p' aber darauf senkrecht sind, so hat man $p = P \times \cos.(\beta - \alpha)$, $p' = P \times \sin.(\beta - \alpha)$, $q = Q \times \sin.\alpha$, und $q' = Q \times \cos.\alpha$. Die senkrecht auf AC gerichteten Kräfte p' und q' werden durch die Festigkeit der schiefen Ebene vernichtet. Da sie beide in demselben Sinne wirken, so gibt ihre Summe $p' + q' = P \times \sin.(\beta - \alpha) + Q \times \cos.\alpha = D$ den senkrechten Druck auf die schiefe Ebene an. Die Kräfte p und q aber wirken in dem entgegengesetzten Sinne; um Gleichgewicht hervorzubringen, müssen sie sich also gegenseitig aufheben, oder es

Digitized by Google

muß $P \times \cos.(\beta - \alpha) = Q \times \sin.\alpha$ sein, d. h. es verhält sich $P : Q = \sin.\alpha : \cos.(\beta - \alpha)$.

§. 417. Wirkt bei einer schiefen Ebene die Kraft in horizontaler Richtung, so muß sich für den Zustand des Gleichgewichts die Kraft zur Last verhalten, wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Basis.

In dem angegebenen Falle ist nämlich $\beta = o$, also $\cos.(\beta - \alpha) = \cos.(o - \alpha) = \cos.(-\alpha) = \cos.\alpha$, folglich ist $P : Q = \sin.\alpha : \cos.\alpha = CB : BA$.

§. 418. Wirkt die Kraft parallel mit der Länge der schiefen Ebene, so verhält sich für den Zustand des Gleichgewichts die Kraft zu der Last, wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Länge.

In diesem Falle wird nämlich $\beta = \alpha$, also $\cos.(\beta - \alpha) = \cos.(\alpha - \alpha) = \cos.o = 1$, und es ist daher $P : Q = \sin.\alpha : 1 = CB : CA$.

§. 419. Für den in §. 417 angenommenen Fall ist der Druck auf die schiefe Ebene $D' = Q \times \cos.\alpha - P \times \sin.\alpha$, weil $\sin.(o - \alpha) = -\sin.\alpha$, und im Falle von §. 418 ist der Druck $D'' = Q \times \cos.\alpha$, weil $\sin.(\alpha - \alpha) = \sin.o = o$ ist.

§. 420. Setzt man an die Stelle der schiefen Ebene eine krumme Fläche, so ist zum Gleichgewicht zwischen Kraft und Last erforderlich, daß die Resultirende beider auf die Fläche senkrecht einwirke, mithin die Richtung derselben auf der Berührungsebene der krummen Fläche in dem Berührungspunkte senkrecht stehe. Dieser Fall reducirt sich hierdurch auf jenen der schiefen Ebene.

Das Gesetz des Gleichgewichts auf der schiefen Ebene hat zuerst Stevin im Jahre 1605 bekannt gemacht, und Galilei hat es später streng bewiesen.

§. 421. Der Keil ist ein dreiseitiges Prisma, welches mit zweien seiner Seitenflächen zwischen zwei Körper oder in die Spalte eines Körpers eingesetzt wird, während auf die dritte Seitenfläche eine Kraft einwirkt, um sie zu trennen. Diejenige Seitenfläche, auf welche die Kraft einwirkt, heißt der Rücken des Keils, die beiden anderen die Seiten desselben, und die Kante, in welcher sich die Seiten durchschneiden, die Schneide oder Schärfe des Keils.

Da die Wirkungsart des dem Spalten widerstehenden Körpers schwierig zu bestimmen ist, so wollen wir in dem Folgenden annehmen, die Kraft wirke senkrecht auf den Rücken des Keils, und auch die zwei Kräfte, welche sich dem Eindringen des Keils entgegensetzen, seien senkrecht gegen die Seiten des Keils gerichtet. In diesem Falle verhalten sich die drei Kräfte zu einander, wie die Seiten desjenigen Dreiecks, in welchem der Keil von einer auf seiner Kante senkrechten Ebene geschnitten wird.

Digitized by Google

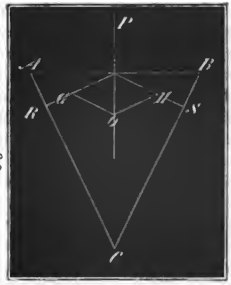


Fig. 127.

Die auf den Rücken einwirkende Kraft P sei = PO (Fig. 127) und R und S seien die auf die Seiten einwirkenden Kräfte. Um nun die Bedingungen des Gleichgewichts zwischen den Kräften P, R und S zu finden, zerlege man P in zwei Seitenkräfte PG und PH, welche auf den Seiten AC und BC senkrecht stehen, so ist offenbar Gleichgewicht vorhanden, wenn R = PG und S = PH ist, oder wenn P : R : S = PO : PG : PH sich verhalten. Nun ist aber △ PGO ∽ △ ABC, denn ∢ GPO = ∢ BAC (beide machen mit ∢ APR einen rechten Winkel aus), und ∢ GOP = ∢ OPH = ∢ ABC (∢ OPH + ∢ HPB = ∢ HPB + ∢ ABC = 1 R). Es ist also PO : PG : PH = AB : AC : BC, folglich für den Zustand des Gleichgewichts P : R : S = AB : AC : BC.

Wenn der Keil ein vollkommenes dreiseitiges Prisma ist, so verhalten sich aber auch AB, AC und BC wie die drei Seitenflächen des Keils, also verhält sich alsdann die Kraft zu den beiden senkrecht gegen die Seiten des Keils gerichteten Widerständen, wie der Rücken des Keils zu den Seiten desselben.

In den meisten Fällen ist der zu den Kanten senkrechte Querschnitt ABC ein gleichschenkliches Dreieck, nämlich AC = BC, dann wird natürlich auch R = S, also P : R = AB : AC, d. h. bei einem gleichschenkligen Keile verhält sich die Kraft zu jedem der gleichen Widerstände, wie der Rücken des Keils zu jeder der gleichen Seiten desselben. Je spitzer der Keil, desto größer ist also der Gewinn an Kraft.

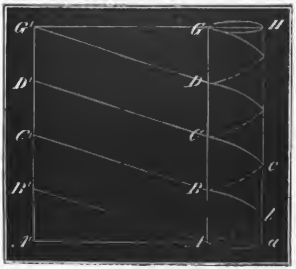


Fig. 128.

§. 422. Wird der Mantel eines graden Cylinders AH (Fig. 128) abgewickelt, so entsteht ein Rechteck AA'G'G, dessen Grundlinie AA' gleich dem Umfange der Grundfläche, und dessen Höhe AG der Höhe des Cylinders gleich ist. Man theile die Seiten AG und A'G' in dieselbe Anzahl gleicher Theile AB = BC = CD = ... = A'B' = B'C' = ..., und ziehe die Transversalen AB', BC', CD' u. s. w. Denkt man sich dann das Rechteck AA'G'G wieder um den Cylinder gewickelt, so fällt A'G' in AG, B' in B, C' in C u. s. w. Die Transversalen AB', BC', CD' u. s. w. bilden also eine um den Cylinder herumlaufende, zusammenhangende krumme Linie AbBcC .... G, welche Schraubenlinie genannt wird. Der Cylinder selbst heißt jetzt ein Schraubencylinder. Ein drei- oder vierseitiger prismatischer Körper, welcher in der Richtung der Schraubenlinie um den Cylinder gelegt wird, heißt ein Schraubengewinde, der mit einem solchen Gewinde versehene Cylinder heißt eine Schraube oder eine Schraubenspindel. Der Theil des Gewindes, welcher einmal um die

Digitized by Google

Spindel herumreicht, z. B. AbB, heißt ein **Schraubengang**, der mit der Are des Cylinders parallele Abstand ab oder bc u. s. w. zweier Schraubengänge heißt die **Höhe eines Schraubengangs**. Sind die Schraubengänge auf der inneren Fläche eines hohlen Cylinders eingeschnitten, so wird derselbe eine **Schraubenmutter** genannt. Schraubenspindel und Schraubenmutter heißen zusammen ebenfalls Schraube. Der Körper, welcher an einem Ende der Schraubenspindel angebracht ist, und an welchem dieselbe gedreht wird, heißt der **Schraubenkopf**.

§. 423. Denkt man sich eine Tangentialebene an den Schraubencylinder, so entstehen durch Abwicklung der Cylinderfläche auf der Tangentialebene lauter grade Linien, welche mit derjenigen Seite des Cylinders, durch welche die Tangentialebene gelegt ist, alle denselben Winkel machen, welchen die Transversalen mit AG bilden, und jede dieser Linien wird eine Tangente ihres Schraubenganges. Man kann daher zu irgend einem Punkte der Schraubenlinie eine Tangente ziehen, wenn man in der Tangentialebene, in welcher der Punkt liegt, ein rechtwinkliges Dreieck beschreibt, dessen mit der Seite des Cylinders parallele Höhe dem Abstande zweier Schraubengänge, dessen Basis dem Umfange des Schraubencylinders gleich ist, und dessen Hypotenuse durch den gegebenen Punkt der Schraubenlinie geht.

§. 424. **Bei der Schraube verhält sich für den Zustand des Gleichgewichts die Kraft zu der Last, wie die Höhe eines Schraubengangs zu der Peripherie, welche der Angriffspunkt der Kraft beschreibt.**

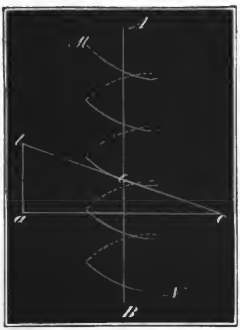


Fig. 129.

Es seien MoN (Fig. 129) die Schraubengänge einer vertical stehenden Spindel, deren Are AB ist, und man suche das statische Verhältniß zwischen der Last Q und der am Umfange des Cylinders horizontal wirkenden Kraft P, vorausgesetzt daß keine Reibung vorhanden sei. Nehmen wir zunächst an, der Cylinder berühre die Schraubenmutter nur in dem Punkte o. Die Last wirkt nun in o vertical abwärts, und weil die Kraft P dasselbe Moment in Beziehung auf die Are AB hat, sie mag auf was immer für einen Punkt am Umfange des Schraubencylinders wirken, so kann man sie auch nach o versetzt denken. Es wirken daher beide Kräfte auf o, und die eine hat zu verhindern, daß der Punkt o nicht längs der Schraubenlinie hinabgleite. Da es aber hier bloß um die Verhinderung des Anfangs der Bewegung zu thun ist, so hat P nur zu verhindern, daß o nicht längs der Tangente bc, d. h. über die schiefe Grade abwärts gehe. Nach §. 417 geschieht dies, wenn $P : Q = ba : ac$ ist. Ist nun aber die Schraube mit mehreren Punkten o, o′, o″ u. s. w. der Schraubenmutter in Berührung, so wird die ganze Last Q in ebenso viele Theile q, q′, q″ u. s. w. zertheilt, von welchen q auf o, q′ auf o′, q″ auf o″ u. s. w. wirkt, und es ist $Q = q + q' + q'' + \ldots$. Ist nun p die Kraft, welche der Last q, p′ diejenige, welche der Last q′

u. ſ. w. das Gleichgewicht hält, ſo hat man $p : q = ba : ac$, $p' : q' = ba : ac$, $p'' : q'' = ba : ac$ u. ſ. w., alſo $p + p' + p'' + \ldots : q + q' + q'' + \ldots = ba : ac$, oder $P : Q = ba : ac$.

Zu demſelben Reſultate wäre man auch durch folgende Betrachtung gelangt: Wird ein Körper durch Umdrehung des Schraubencylinders dazu gebracht, ſich auf der Schraubenlinie zu bewegen, ſo ſieht man ein, daß bei einer ganzen Umdrehung die Kraft eine Strecke hat durchlaufen müſſen, welche der Peripherie, die der Angriffspunkt der Kraft beſchreibt, gleich iſt, während die Laſt nur um die Höhe eines Schraubenganges gehoben worden iſt. Da nun Kraft und Laſt ſich ſtets umgekehrt zu einander verhalten, wie die von ihnen in gleichen Zeiten zurückgelegten Wege, ſo findet alſo zwiſchen ihnen bei der Schraube das behauptete Verhältniß ſtatt.

§. 425. Das im vorigen §. angegebene Verhältniß würde, wie bemerkt wurde, ſtattfinden, wenn keine Reibung vorhanden wäre. Dieſe iſt aber bei der Schraube ſehr groß, und wird ohne Zweifel dadurch noch vergrößert, daß 1) ſelten die Schraubenſpindel mit völliger Genauigkeit in die Mutter paßt, wodurch dann Klemmungen entſtehen, welche nicht bloß von dem Drucke der Laſt abhängen, und 2) daß die Schraubengänge als nicht vollkommen feſt bei dem Drucke der Laſt ihre Form etwas verändern, und ſo jene Klemmungen vermehren.

§. 426. Eine Schraubenſpindel, welche nur 3 bis 4 Gänge hat, ſich um ihre Are dreht, ohne fortzurücken, und deren Gewinde nicht in die Gänge einer Mutter, ſondern in die Zähne eines Stirnrades oder einer gezahnten Stange eingreift, heißt eine *Schraube ohne Ende*, weil, wenigſtens bei einem Rade, die Drehung der Spindel ohne Aufhören fortgeſetzt werden kann. Das Rad iſt gewöhnlich mit einer Welle verſehen, um welche ſich ein Seil aufwickelt, an dem die Laſt hängt. Iſt r der Radius der Welle, ϱ der des Rades, h die Höhe eines Schraubenganges, und R der Hebelarm der auf die Schraube wirkenden Kraft P, ſo iſt $Q : Q' = \varrho : r$ (§. 404) und $Q' : P = 2R\pi : h$ (§. 424), alſo $Q \times Q' : Q' \times P = 2R\varrho\pi : rh$, oder $Q : P = 2R\varrho\pi : rh$.

§. 427. Eine merkwürdige Anwendung der Schraube iſt auch die *Archimediſche Schraube* oder *Waſſerſchraube*. Man verſteht darunter ein ſchraubenförmiges Rohr, das ſich um eine Are bewegen läßt. Sie wird gewöhnlich angewandt, um aus abgedämmten Stellen das Waſſer zu entfernen. Zu dem Ende ſtellt man ſie mit ihrem unteren Ende in das Waſſer, doch ſo, daß ſie mit dem Waſſerſpiegel einen ziemlich ſpitzen Winkel bildet. Wird ſie dann um ihre Are gedreht, ſo wird das Waſſer, das den unterſten Theil eines Schraubenganges füllt, gehoben und durch ſein eigenes Gewicht in den nächſtfolgenden Schraubengang herablaufen, weil es durch die ſtarke Neigung der Maſchine und die ſchnelle Umdrehung nicht Zeit gewinnt, wieder zurückzulaufen. So wird es durch alle Schraubengänge geführt, und zuletzt oben auslaufen.

Digitized by Google

Zweites Kapitel.

Dynamik fester Körper.

§. 428. Bewegung besteht in der Veränderung des Ortes. Man unterscheidet nun aber einen absoluten und eine relativen Ort eines Körpers, und versteht unter ersterem den Theil des ganzen unendlichen Raumes, den der Körper einnimmt, unter letzterem dagegen diejenige Stelle, die ihm in Beziehung auf andere Körper zukommt. Daß wir hiernach nur den relativen Ort eines Körpers bestimmen können, leuchtet wohl ein. Je nachdem nun der Körper seinen absoluten oder seinen relativen Ort verändert, je nachdem sagt man, er sei in absoluter oder relativer Bewegung. Ob ein Körper sich in absoluter Bewegung befinde, vermögen wir nicht zu erkennen, da wir ja seinen absoluten Ort nicht bestimmen können. Wir könnten eine absolute Bewegung nur dann wahrnehmen, wenn uns in dem unendlichen Raume gewisse feste Punkte bekannt wären. Die relative Bewegung erkennt man aus der Veränderung der Stellung eines Körpers gegen andere, welche wir für ruhend halten. Ueber gleichförmige, beschleunigte, und verzögerte Bewegung, Geschwindigkeit und Endgeschwindigkeit s. oben §. 359. Je nachdem die Bahn des bewegten Körpers grade oder krumm ist, je nachdem heißt die Bewegung gradlinig oder krummlinig. Bewegt sich ein Körper in einer graden Linie, so ist diese zugleich die Richtung seiner Bewegung. Ist der Weg aber eine krumme Linie, so kann von der Richtung seiner Bewegung im Allgemeinen nicht mehr die Rede sein, da er sie ja in jedem Momente verändert. Die Richtung aber, die der Körper in einem bestimmten Punkte seiner Bahn oder seines Weges hat, wird alsdann bestimmt durch die Tangente, welche an diesen Punkt seiner Bahn gezogen wird. Die Bewegungen werden auch eingetheilt in fortschreitende oder progressive und in drehende oder rotirende. Bei der ersteren beschreiben alle unveränderlich mit einander verbundene Punkte des Beweglichen parallele Bahnen, bei der letzteren bleibt während der Bewegung eines Körpers ein mit ihm unveränderlich verbundener Punkt oder eine Linie in Ruhe. Bewegen sich zwei Körper gleichförmig in einerlei grader Linie, so kann man die Bewegung dieser Körper in Bezug auf einander untersuchen, und fragen, wieviel sie sich in jeder Secunde einander genähert, oder von einander entfernt haben. Dieser Raum wird alsdann die relative Geschwindigkeit genannt, und ist mit der absoluten Geschwindigkeit oder demjenigen Raume nicht zu verwechseln, welchen der Körper wirklich in jeder Secunde durchlaufen hat.

Da bei bewegten Körpern öfter fortschreitende und drehende Bewegung verbunden sind, so werden wir, um diese zusammengesetzteren Bewegungen zuerst ganz von unserer Betrachtung auszuschließen, unsere Untersuchung auf die Bewegung eines materiellen Punktes beschränken.

A. Von der gradlinigen gleichförmigen Bewegung.

§. 429. Jede momentan wirkende Kraft kann nur eine gradlinige und gleichförmige Bewegung hervorbringen.

Digitized by Google

Die Elemente der Bewegung eines frei beweglichen Punktes werden ja natürlich nur durch die Kraft bestimmt, welche die Bewegung erzeugt. Das Bewegliche vermag also durch sich selbst weder die Richtung, noch die Geschwindigkeit zu ändern, und so müssen beide bei einer momentan wirkenden Kraft stets unverändert bleiben, d. h. das Bewegliche muß eine gradlinige und gleichförmige Bewegung annehmen.

§. 430. Aus dem Begriff der gleichförmigen Bewegung folgt, daß, wenn S und s die in den Zeiten T und t zurückgelegten Wege bedeuten, sich $S : s = T : t$ verhält. Für $t = 1$, ist s der in der Zeiteinheit zurückgelegte Weg, d. h. die Geschwindigkeit. Bezeichnet man diese mit C, so hat man $S : C = T : 1$, und daraus 1) $S = CT$ d. h. der in einer gegebenen Zeit zurückgelegte Weg ist gleich dem Produkte aus der Zeit in die Geschwindigkeit; 2) $C = \frac{S}{T}$, d. h. die Geschwindigkeit wird gefunden, wenn man den in einer gegebenen Zeit zurückgelegten Weg durch die Zeit dividirt; 3) $T = \frac{S}{C}$, d. h. die Dauer der Bewegung wird gefunden, wenn man den zurückgelegten Weg durch die Geschwindigkeit dividirt. Diese drei Formeln enthalten alle Gesetze der gradlinigen gleichförmigen Bewegung.

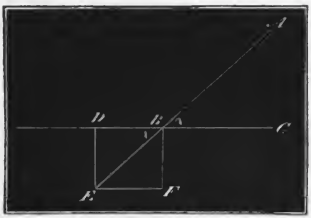
§. 431. Haben S_1, C_1 und T_1 dieselbe Bedeutung für einen zweiten Körper, so ist $S_1 = C_1 T_1$, $T_1 = \frac{S_1}{C_1}$ und $C_1 = \frac{S_1}{T_1}$, folglich 1) $S : S_1 = CT : C_1T_1$, d. h. die von zwei verschiedenen Körpern zurückgelegten Wege verhalten sich allgemein wie die Produkte aus den Geschwindigkeiten in die Zeiten; 2) $T : T_1 = \frac{S}{C} : \frac{S_1}{C_1} = SC_1 : S_1C$, d. h. die Zeiten verhalten sich wie die Produkte aus den zurückgelegten Wegen in die umgekehrten Geschwindigkeiten; 3) $C : C_1 = \frac{S}{T} : \frac{S_1}{T_1} = ST_1 : S_1T$, d. h. die Geschwindigkeiten verhalten sich wie die zurückgelegten Wege in die umgekehrten Zeiten. Bewegen sich beide Körper mit gleicher Geschwindigkeit, oder ist $C = C_1$, so ist, wenn man in 1 aus den Gliedern des zweiten Verhältnisses die gleichen Factoren C und C_1 wegläßt, 4) $S : S_1 = T : T_1$, d. h. bei zwei Körpern, welche sich mit gleicher Geschwindigkeit bewegen, verhalten sich die zurückgelegten Wege wie die darauf verwandten Zeiten. Ist $T = T_1$, so ist, wenn man jetzt aus den Gliedern des zweiten Verhältnisses in 1 die gleichen Factoren T und T_1 wegläßt, 5) $S : S_1 = C : C_1$, d. h. bei zwei sich gleich lang bewegenden Körpern verhalten sich die von ihnen zurückgelegten Wege wie ihre Geschwindigkeiten. Ist endlich $S = S_1$, so ist, wenn man in den Gliedern des zweiten Verhältnisses in 2 die gleichen Factoren S und S_1 wegläßt, $T : T_1 = C_1 : C$, d. h. damit zwei Körper gleiche Wege zurücklegen, müssen sich die Zeiten, welche sie dazu brauchen, umgekehrt wie ihre Geschwindigkeiten verhalten.

Digitized by Google

§. 432. Weil die Geschwindigkeit eines bewegten Punktes das Maß der sie hervorbringenden Kraft ist, so kann die Geschwindigkeit grade wie die Kraft, welche sie hervorbringt, in mehrere Seitengeschwindigkeiten zerlegt werden; und ebenso können verschiedene, einem Punkte nach beliebigen Richtungen mitgetheilte Geschwindigkeiten zu einer Mittelgeschwindigkeit zusammengesetzt werden, und es gelten hierfür genau dieselben Lehrsätze und Formeln, welche in der Statik für das Zerlegen und Zusammensetzen der Kräfte gefunden wurden.

§. 433. Es soll der Verlust an Geschwindigkeit bestimmt werden, welchen ein gleichförmig sich bewegender Punkt dadurch erleidet, daß er durch ein Hinderniß unter einem gegebenen Winkel plötzlich von seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt wird.

Fig. 130.



Der Punkt bewege sich nach der Richtung AB (Fig. 130) mit der Geschwindigkeit C, und treffe in B ein Hinderniß CD unter einem Winkel $ABC = \alpha$. Man mache $BE = C$, und zeichne das Rechteck BDEF, so wird die auf CD senkrechte Geschwindigkeit BF von dem Hinderniß CD aufgehoben, und der Körper behält nur noch nach der Richtung BD die Geschwindigkeit $BD = C \times \cos.\alpha$. $\cos.\alpha$. ist $= 1 -$ sin. vers. α, also $BD = C\,(1 -$ sin.vers.$\alpha.) = C - C \times$ sin.vers.α. Der Punkt hat also durch die Ablenkung von seiner Bahn $C \times$ sin.vers.α. an Geschwindigkeit verloren.

Fig. 131.

§. 434. Trifft der Punkt in seiner Bahn auf ein Hinderniß, welches ihn nöthigt, die krumme Linie BG (Fig. 131), welche seine vorherige Richtung AB in B tangirt, zu durchlaufen, so wird in diesem Falle keine Verminderung der Geschwindigkeit stattfinden, weil $\alpha = o$, also sin.vers.$\alpha = o$ und daher auch $C \times$ sin.vers.$\alpha = o$ ist.

B. Von der gradlinigen veränderlichen Bewegung.

§. 435. Die beschleunigte Bewegung wird eingetheilt in eine gleichförmig beschleunigte und eine ungleichförmig beschleunigte; bei der ersteren erhält der sich bewegende Punkt in allen, auch noch so kleinen, gleich großen Zeittheilchen gleich viel Zusatz an Geschwindigkeit, bei der letzteren ist die Zunahme an Geschwindigkeit in gleichen Zeiten nicht gleich groß. Ebenso unterscheidet man auch eine gleichförmig und eine ungleichförmig verzögerte Bewegung.

Eine Kraft, welche fortwährend und überall gleich stark auf einen Körper einwirkt, er mag ruhen, sich schnell oder langsam bewegen, heißt eine beständige oder absolute Kraft. Wenn hingegen eine Kraft anders auf einem ruhenden und anders auf einen verschiedentlich bewegten Körper einwirkt, so heißt sie eine relative oder veränderliche Kraft.

Digitized by Google

§. 436. Eine jede beständige Kraft, welche auf einen bewegten Punkt einwirkt, verursacht eine gleichförmig beschleunigte Bewegung.

Eine solche Kraft strebt nämlich, den Punkt, er mag sich langsam oder schnell bewegen, immer mit gleicher Stärke fortzutreiben, und ertheilt ihm dadurch in gleichen Zeiten immer einen gleichen Zusatz an Geschwindigkeit.

§. 437. Bei der gradlinigen gleichförmig beschleunigten Bewegung sind die Endgeschwindigkeiten den von Anfang der Bewegung an verflossenen Zeiten proportional.

Man denke sich die Zeiteinheit (Secunde) in n gleiche Theile getheilt, wo n beliebig groß gedacht werden kann, und stelle sich für's Erste vor, die Kraft wirke am Anfang eines jeden dieser n Zeittheilchen einmal auf den Punkt. Statt einer stetigen Kraft erhält man dann freilich eine stoßweise wirkende, allein wenn man sich diese Zwischenzeiten zuletzt nur klein genug, also n groß genug denkt, so wird man dadurch eine stetig wirkende Kraft erhalten. Unter den gemachten Voraussetzungen wird also die erste Einwirkung der Kraft dem Punkte eine Bewegung mittheilen, welche in Richtung und Geschwindigkeit unverändert bleibt, bis die Kraft zum zweiten Male auf den Punkt wirkt. Gesetzt, die in diesem ersten Zeittheilchen erlangte Geschwindigkeit des Punktes sei v, so behält er diese wegen des Beharrungsvermögens während des zweiten Zeittheilchens, und hierzu bekommt er noch einmal die Geschwindigkeit v durch die neue Einwirkung der Kraft, so daß er während des zweiten Zeittheilchens und am Ende desselben die Geschwindigkeit 2v hat. Auf dieselbe Weise erlangt er nach dem dritten, vierten, ... n^{ten} Zeittheilchen beziehlich die Endgeschwindigkeiten 3v, 4v, ... nv. Die Endgeschwindigkeit der ersten Secunde ist demnach $= nv$, welches wir $= g$ setzen wollen. Da die Kraft während der zweiten, und jeder folgenden Secunde genau dieselbe Wirkung auf den Punkt ausübt, wie in der ersten, so wird die Endgeschwindigkeit der zweiten, dritten, ... t^{ten} Secunde beziehlich 2g, 3g, ... tg sein, und dies bleibt wahr für jeden Werth von n, auch noch wenn $n = \infty$, also die Kraft stetig wirkend gedacht wird.

Die Endgeschwindigkeit der ersten Secunde, also g, nennt man die Acceleration.

§. 438. Der von einem gleichförmig beschleunigten Punkte in einer gewissen Zeit zurückgelegte Weg ist halb so groß, wie derjenige, welchen der Punkt in derselben Zeit bei gleichförmiger Bewegung mit der erlangten Endgeschwindigkeit zurücklegen würde.

Der in der Zeit t mit gleichförmig beschleunigter Bewegung zurückgelegte Weg sei s, und die in der Zeit t erlangte Endgeschwindigkeit sei c, so ist zu beweisen, daß $s = \frac{ct}{2}$ ist. Man denke sich die Zeit t in n gleiche Theile getheilt, und denke sich einstweilen die bewegende Kraft wieder stoßweise wirkend; v sei die in dem ersten Zeittheilchen durch den ersten Stoß erlangte Geschwindigkeit, so ist v zugleich auch der in dem ersten Zeittheilchen zurückgelegte Weg. Durch den am Anfange des zweiten Zeittheilchens erfolgenden Stoß wird die Geschwindigkeit und also auch der zurückgelegte Weg $= 2v$ (§. 437). Im dritten Zeittheilchen ist der zurückge-

Digitized by Google

legte Weg $= 3v$, im nten Zeittheilchen $= nv$, also in allen n Zeittheilchen oder in der Zeit t ist der zurückgelegte Weg $s = v + 2v + 3v + \ldots + nv = (1 + 2 + 3 + \ldots + n)v = \frac{n.(n+1)}{2}v$. Am Ende der Zeit t ist die Endgeschwindigkeit $c = nv$ (§. 437). In den n Zeittheilchen, in welche wir die Zeit t getheilt haben, würde also der Punkt bei gleichförmiger Bewegung mit der Endgeschwindigkeit c oder nv den Weg $nv \times n$ oder n^2v zurückgelegt haben, welchen wir s' nennen wollen. Nun ist $s : s' = \frac{n(n+1)}{2} v : n^2v$. Um aber statt der stoßweise wirkenden Kraft eine stetig wirkende zu erhalten, muß $n = \infty$ gesetzt werden. Dann aber ist $n + 1 = n$ und $n(n+1) = n^2$, folglich $s : s' = \frac{n^2}{2} v : n^2v = \frac{1}{2} : 1 = 1 : 2$, und $s = \frac{s'}{2}$; s' ist aber auch $= ct$ (§. 430), also ist $s = \frac{1}{2} ct$.

§. 439. Nach §. 437 ist die Endgeschwindigkeit c für die Zeit t auch $= gt$. Wird dieser Werth für c in die eben gegebene Gleichung $s = \frac{1}{2} ct$ eingesetzt, so erhält man $s = \frac{1}{2} gt \times t = \frac{1}{2} gt^2$, d. h. **der in einer gewissen Zeit zurückgelegte Weg wird gefunden, wenn man das Quadrat der Zeit mit der halben Endgeschwindigkeit der ersten Secunde multiplicirt.**

Für $t = 1$ ist demnach $s = \frac{1}{2} g$, d. h. **der in der ersten Secunde zurückgelegte Weg ist gleich der halben Endgeschwindigkeit der ersten Secunde.**

Sind s und s' die in den Zeiten t und t' zurückgelegten Wege, so ist $s = \frac{1}{2} gt^2$ und $s' = \frac{1}{2} gt'^2$, also $s : s' = \frac{1}{2} gt^2 : \frac{1}{2} gt'^2 = t^2 : t'^2$, d. h. **die in verschiedenen Zeiten zurückgelegten Wege verhalten sich wie die Quadrate der Zeiten.**

§. 440. **Die in auf einander folgenden gleichen Zeiten zurückgelegten Wege wachsen im Verhältniß der auf einander folgenden ungraden Zahlen.**

Ist s der in der Zeit t, und s' der in der Zeit $t - 1$ zurückgelegte Weg, dann ist nach dem vorhergehenden Paragraphen $s = \frac{1}{2} gt^2$ und $s' = \frac{1}{2} g(t-1)^2$, also $s - s' = \frac{1}{2} gt^2 - \frac{1}{2} g(t-1)^2 = \frac{1}{2} g[t^2 - (t-1)^2] = \frac{1}{2} g[t^2 - (t^2 - 2t + 1)] = \frac{1}{2} g(t^2 - t^2 + 2t - 1) = \frac{1}{2} g(2t - 1)$.

Setzt man hier für t nach einander die Werthe 1, 2, 3, 4 u. s. w., so findet man für $s - s' = \frac{1}{2} g, \frac{3}{2} g, \frac{5}{2} g, \frac{7}{2} g$. u. s. w.

§. 441. Nach §. 437 ist 1) $c = gt$, d. h. die Endgeschwindigkeit in einem bestimmten Momente ist gleich dem Produkte aus der Acceleration in die seit dem Beginn der Bewegung verflossene Zeit. Daraus folgt aber 2) $g = \frac{c}{t}$, d. h. die Acceleration ist gleich dem Quotienten aus der Endgeschwindigkeit in einem bestimmten Zeitmomente durch die bis dahin verflossene Zeit, und 3) $t = \frac{c}{g}$, d. h. die auf die Bewegung verwandte Zeit wird gefunden, wenn man die Endgeschwindigkeit durch die Acceleration dividirt. Aus der in §. 439 gefun-

Digitized by Google

denen Formel 4) $s = \frac{1}{2} gt^2$, folgt 5) $g = \frac{2s}{t^2}$, d. h. die Acceleration ist gleich dem doppelten zurückgelegten Weg dividirt durch das Quadrat der auf die Bewegung verwandten Zeit, und 6) $t = \sqrt{\frac{2s}{g}}$, d. h. die auf die Bewegung verwandte Zeit wird gefunden, wenn man aus dem Quotienten des doppelten zurückgelegten Weges durch die Acceleration die Quadratwurzel zieht. Wenn man in 1 für g den in 5 gefundenen Werth einsetzt, dann ist 7) $c = \frac{2s}{t^2} \cdot t = \frac{2s}{t}$, d. h. die Endgeschwindigkeit in einem bestimmten Momente ist auch gleich dem Quottienten aus dem doppelten bis zu dem Momente zurückgelegten Weg durch die darauf verwandte Zeit. Aus 7 folgt dann wieder 8) $s = \frac{1}{2} ct$ (vergl. §. 438) und 9) $t = \frac{2s}{c}$, d. h. die Zeitdauer der Bewegung ist gleich dem doppelten zurückgelegten Weg dividirt durch die Endgeschwindigkeit. Wird endlich in 1 der Werth für t aus 6 eingesetzt, dann ist 10) $c = g \times \sqrt{\frac{2s}{g}} = \sqrt{g^2} \cdot \sqrt{\frac{2s}{g}} = \sqrt{\frac{2sg^2}{g}} = \sqrt{2sg}$, d. h. die Endgeschwindigkeit ist gleich der Quadratwurzel aus dem Produkte des doppelten zurückgelegten Weges in die Acceleration. Aus 10 folgt nun wieder 11) $s = \frac{c^2}{2g}$, d. h. der zurückgelegte Weg ist gleich dem Quadrate der Endgeschwindigkeit dividirt durch die doppelte Acceleration, und 12) $g = \frac{c^2}{2s}$, d. h. die Acceleration ist gleich dem Quadrate der Endgeschwindigkeit dividirt durch den doppelten zurückgelegten Weg.

Diese 12 Gleichungen zeigen, daß, wenn von den 4 Größen g, c, t und s zwei bekannt sind, die anderen zwei stets durch Rechnung gefunden werden können.

§. 442. Zu den gleichförmig beschleunigten Bewegungen wird der freie Fall der Körper gerechnet. Der Fall heißt frei, wenn bei der Bewegung des fallenden Körpers von allen Hindernissen der Bewegung, namentlich von dem Widerstande des Mittels, ganz abgesehen wird. Er ist zwar eine Wirkung der Schwerkraft, und diese ist keine beständige Kraft, weil eigentlich ihre Wirkung in einerlei Verticalrichtung von Oben nach Unten hin bis zur Erdoberfläche an Intensität zunimmt (§. 378), aber dieses Stärkerwerden der Wirkung ist in Abständen, welche gegen den Erdhalbmesser sehr klein sind, unmerklich, und man kann bei der Betrachtung des freien Falles der Körper von geringen Höhen herab füglich annehmen, daß die Schwere constant wirke. Die Gesetze des freien Falles sind demnach dieselben, wie die in den vorhergehenden Paragraphen entwickelten. Der Fallraum der ersten Secunde, also $\frac{1}{2} g$, ist für unsere Gegenden = $15\frac{1}{2}$ rheinl. Fuß, welcher Werth natürlich nur von der Stärke der Ein-

Digitized by Google

wirkung der Schwerkraft abhängt. Wie die Größe dieses Fallraumes bestimmt werden konnte, kann erst später gelehrt werden (vergl. §. 447) *).

§. 443. Die Richtigkeit der Voraussetzung, daß dem freien Fall der Körper eine mit constanter Intensität wirkende Kraft zu Grunde gelegt werden darf, beruht auf der Uebereinstimmung der Rechnungsresultate mit der Erfahrung. Versuche, welche dieses bestätigen, lassen sich wegen der zu bedeutenden Höhe, welche dazu erfordert würde, und wegen des Widerstandes der Luft nicht wohl machen; aber es gibt eine Vorrichtung, die Atwood'sche Fallmaschine, mittelst welcher man die Fallhöhe in einer Secunde beliebig vermindern, und aus den Resultaten der Versuche, welche sich mit ihr anstellen lassen, doch auf die Gesetze beim freien Fall schließen kann. Ueber eine äußerst bewegliche Rolle, die auf einem etwa 6 Fuß hohen Ständer befestigt ist, geht ein feiner Seidenfaden, an dessen beiden Enden zwei ganz gleiche Gewichte befestigt sind. Legt man auf das eine derselben noch ein kleines Aufgewicht, so bekommt es das Uebergewicht und fällt; da es aber zugleich auch das andere Gewicht mit in Bewegung setzen muß, so wird die Größe der Bewegung des Aufgewichts auf die beiden gleichen Gewichte mitvertheilt, und die Geschwindigkeit wird demnach in demselben Verhältnisse kleiner, in welchem die Masse größer wird, auf welche sich die Quantität der Bewegung vertheilt. Um die Größe der durchlaufenen Wege messen zu können, ist an dem Ständer seiner ganzen Länge nach ein Maßstab angebracht. Außerdem läßt sich an dem Ständer noch ein Schieber auf und ab bewegen, der den Zweck hat, an irgend einer Stelle des Maßstabes die Bewegung des fallenden Körpers dadurch, daß er diesem eine feste Unterlage darbietet, unterbrechen zu können. Da aber zu diesen Beobachtungen ein genaues Zeitmaß unumgänglich nothwendig ist, so ist mit dem Apparate gewöhnlich noch ein Secundenpendel verbunden, und zwar, da die Messung der Zeit genau in demselben Momente beginnen muß, in welchem die Fallbewegung anfängt, bei den besseren Instrumenten auf eine solche Weise, daß durch das erste Aufheben des Pendels ein Hebelwerk in Bewegung gesetzt wird, dessen eines Ende bis dahin die Rolle festgehalten hatte, nun aber sich selbst überläßt. Wie die Größe des Aufgewichtes berechnet werden könne, damit in der ersten Secunde statt $15\frac{1}{2}$ rheinl. Fuß nur ein bestimmter Raum, z. B. nur ein Zoll durchfallen werde, zeigt folgende Betrachtung. Es sei M das Gesammtgewicht des Fadens, der zwei gleichen Gewichte und des zur Ueberwindung der Reibung nöthigen Gewichtes, x das zu suchende Gewicht des Aufgewichtes, g die Beschleunigung der Schwere beim freien Fall, und g' diejenige an der Fallmaschine, so ist, weil die bewegende Kraft oder die Größe der Bewegung gx (§. 360) der Masse M + x die Acceleration g', d. h. die bewegende Kraft (M+x)g'

*) Ließe man z. B. einen Stein aus der Höhe einer Meile herabfallen (der höchsten bisherigen Erhebung über dem Meeresspiegel), so würde der Abstand von dem Erdmittelpunkt 861 Meilen betragen, wenn der Erdhalbmesser zu 860 Meilen angenommen wird. Die Fallgeschwindigkeit in einer solchen Höhe verhält sich demnach zu derjenigen an der Erdoberfläche oder zu $15\frac{1}{2}$ rheinl. Fuß, wie 860^2 zu 861^2, und ist daher $= 15\frac{1}{2} \times \frac{860^2}{861^2}$, was nach der Berechnung um etwas über $\frac{1}{4}$ Zoll kleiner ist, als $15\frac{1}{2}$ Fuß, und somit die in dem Paragraphen gemachte Annahme einer constanten Wirkung der Schwere beim freien Fall rechtfertigt.

Digitized by Google

ertheilt, $gx = (M + x)\,g'$, $gx - g'x = Mg'$, $(g - g')\,x = Mg'$, und $x = \frac{Mg'}{g - g'}$.

§. 444. In den in der Natur vorkommenden Fällen bewegen sich fallende Körper in einem widerstehenden Mittel, und sind darum nicht gleichförmig beschleunigt. In einem Mittel von gleicher Dichte nähert sich der Fall der gleichförmigen Bewegung immer mehr. In Mitteln von zunehmender Dichte, z. B. in der atmosphärischen Luft, kann die Bewegung wirklich gleichförmig, ja wohl gar verzögert werden, wie wir dies z. B. an Papierschnitzchen oder Federn sehen. Dem Widerstande der Luft muß es auch zugeschrieben werden, daß nicht alle Körper von derselben Höhe gleich schnell zur Erde herabfallen; der dichtere kann den Widerstand leichter überwinden, als der minder dichte, weil er in demselben Volumen, mithin bei demselben Widerstande des Mittels, mehr bewegende Kraft hat, als der minder dichte. Uebrigens muß ein schwerer Körper in einem schweren Mittel schon unabhängig von dem Widerstande desselben langsamer fallen, weil er in demselben einen Theil seiner Schwere verliert.

§. 345. Eine gradlinige Bewegung mit veränderlicher Geschwindigkeit erfolgt auch noch, wenn eine momentan wirkende Kraft den Punkt nach einer Richtung hintreibt, und eine stetige Kraft entweder in derselben oder in der genau entgegengesetzten Richtung auf denselben einwirkt. Der erste Fall tritt z. B. ein bei einem vertical niederwärts, der zweite bei einem vertical aufwärts geworfenen Körper. Theilt die momentane Kraft dem materiellen Punkte die Geschwindigkeit v mit, und treiben beide Kräfte den Punkt nach derselben Richtung hin, so ist offenbar: 1) $c = v + gt$ und 2) $s = vt + \frac{1}{2}gt^2$. Aus diesen beiden Gleichungen ergeben sich aber auch noch die folgenden: 3) $v = c - gt$, 4) $t = \frac{c - v}{g}$, 5) $g = \frac{c - v}{t}$, 6) $v = \frac{s - \frac{1}{2}gt^2}{t}$, 7) $t = \frac{-v \pm \sqrt{2gs + v^2}}{g}$, 8) $g = \frac{s - vt}{\frac{1}{2}t^2}$.

Wirken die beiden Kräfte nach genau entgegengesetzten Richtungen auf den materiellen Punkt, so hat man in der Richtung der momentanen Kraft: 1) $c = v - gt$ und 2) $s = vt - \frac{1}{2}gt^2$; in der Richtung der stetigen Kraft hat man dagegen: 1) $c = gt - v$ und 2) $s = \frac{1}{2}gt^2 - vt$. Aus diesen Gleichungen lassen sich wieder auf einfache Weise andere zur Bestimmung von v, g und t entwickeln. Wenn die Kräfte einander entgegen wirken, so muß der Punkt einmal zur Ruhe kommen; um zu finden, wann dies geschehe, setze man $c = o$, und löse nach t auf, so erhält man $t = \frac{v}{g}$. Um dann ferner zu finden, wie weit sich der Punkt bis zu diesem Augenblicke bewegt habe, substituire man diesen Werth von t in die Gleichung $s = vt - \frac{1}{2}gt^2$, so ist $s = v \cdot \frac{v}{g} - \frac{1}{2}g \cdot \frac{v^2}{g^2} = \frac{v^2}{g} - \frac{\frac{1}{2}v^2}{g}$ $= \frac{\frac{1}{2}v^2}{g} = \frac{v^2}{2g}$. Von da an bewegt sich dann der Punkt wieder vermöge

Digitized by Google

der stetigen Kraft allein zurück. Die Zeit, welche er hierzu braucht, ist nach §. 441 $t = \sqrt{\frac{2s}{g}}$. Wird für s der Werth $\frac{v^2}{2g}$ eingesetzt, so findet man die Zeit, in welcher der Punkt den Weg $\frac{v^2}{2g}$ wieder zurück durchläuft, $= \frac{v}{g}$, also genau dieselbe Zeit, in welcher er von dem Anfange der Bewegung an bis zu dem Punkte gelangte, wo er zur Ruhe kam. Die Geschwindigkeit, welche der Punkt bis dahin erlangt, von wo er anfänglich ausging, findet man aus $c = gt$, wenn man für t den Werth $\frac{v}{g}$ setzt, nämlich $c = v$, sie ist also gleich der anfänglichen, dem Punkte durch die momentane Kraft mitgetheilten Geschwindigkeit. Die Bewegung, welche der Punkt bis zu dem Augenblick hatte, wo seine Geschwindigkeit zu Null wurde, ist offenbar die gleichmäßig verzögerte Bewegung.

§. 446. Befindet sich ein schwerer Körper auf einer schiefen Ebene, so wird durch den Widerstand derselben ein bestimmter Theil der Schwere aufgehoben, und die Bewegung abwärts erfolgt nur noch durch einen Theil der Schwere. Da dieser Theil constant ist, und continuirlich wirkt, so muß auch daraus eine gleichförmig beschleunigte Bewegung hervorgehen, vorausgesetzt, daß von allen Hindernissen der Bewegung abstrahirt wird.

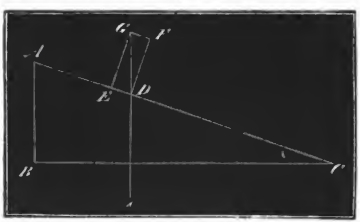


Fig 132.

Stellt z. B. AC (Fig. 132) den Durchschnitt einer schiefen Ebene mit einer auf ihr senkrecht stehenden verticalen Ebene vor, ist AB ihre Höhe, AC ihre Länge, BC ihre Basis, $\sphericalangle ACB = \sphericalangle \alpha$ ihr Neigungswinkel, und endlich G der Schwerpunkt des Körpers, Gx die Richtung der Schwere, GD die Beschleunigung der Schwere beim freien Fall, also $= g$; so kann man GD in das auf AC senkrechte GE und das mit AC parallele GF zerlegen, wovon ersteres durch den Widerstand der schiefen Ebene aufgehoben wird, während das letztere eine Bewegung längs derselben hervorbringt, und relative Schwere heißt. Es ist $\sphericalangle F = \sphericalangle B = 1\,R.$, $\sphericalangle FGD = \sphericalangle GDE = \sphericalangle BAC$, also auch $\sphericalangle FDG = \sphericalangle ACB = \sphericalangle \alpha$, und daher $GF = GD \times \sin.\alpha = g \,.\, \sin.\alpha$, also eine Kraft, welche für einerlei Werth von α beständig ist, so lange g unverändert bleibt. Setzt man demnach in die Formeln für die gleichförmig beschleunigte Bewegung $g \,.\, \sin.\alpha$ statt g, so gelten die so entstehenden Formeln für die Fallbewegung über eine schiefe Ebene; also ist jetzt $c = gt \,.\, \sin.\alpha$, $s = \frac{1}{2}gt^2 \,.\, \sin.\alpha$ u. s. w. (§. 441).

§. 447. Aus $s = \frac{1}{2}gt^2 \,.\, \sin.\alpha$ folgt $g = \frac{2s}{t^2 \,.\, \sin.\alpha}$. Es ist uns also in einem Körper, den man über eine schiefe Ebene von beliebig gegebener

Digitized by Google

Neigung herunterfallen läßt, ein Mittel gegeben, g oder die Beschleunigung der Schwere beim freien Fall zu finden. Man hat zu diesem Behufe nur die Zeit t des Falles zu beobachten, da s und α vorher mit der größten Genauigkeit gemessen werden können (vergl. §. 442).

Galilei war der erste, der im Jahre 1602 mittelst der schiefen Ebene zuerst die Gesetze des Falles schwerer Körper in der Erfahrung dargethan.

§. 448. Ein Körper, welcher über die Länge einer schiefen Ebene herunter gefallen ist, hat dieselbe Endgeschwindigkeit erlangt, welche ein durch die Höhe derselben schiefen Ebene frei gefallener Körper erlangt.

Nach §. 446 verbunden mit §. 441 ist die Endgeschwindigkeit eines über die schiefe Ebene von der Länge l und der Höhe h ganz herabgefallenen Körpers $c = \sqrt{2\,gl.\,sin.\,\alpha}$; $sin.\alpha$ ist aber $= \frac{AB}{AC} = \frac{h}{l}$, folglich ist $c = \sqrt{2\,gl.\frac{h}{l}} = \sqrt{2\,gh}$. Dieses ist aber auch die Endgeschwindigkeit eines durch den Raum h frei gefallenen Körpers.

Eine Folge hiervon ist, daß ein Körper beim Fall über zwei schiefe Ebenen von verschiedenen Neigungswinkeln, aber gleichen Höhen, eine gleiche Geschwindigkeit erlangt.

§. 449. Die auf der schiefen Ebene erlangte Geschwindigkeit verhält sich zu der Geschwindigkeit, welche in derselben Zeit durch den freien Fall erlangt wird, wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Länge.

Es sei c die Endgeschwindigkeit auf der schiefen Ebene in der Zeit t, und c' die Endgeschwindigkeit für dieselbe Zeit bei dem freien Fall, so ist nach §. 446 $c = gt.\,sin.\alpha$, und da nach §. 448 $sin.\alpha = \frac{h}{l}$ ist, so ist $c = \frac{g\,t\,h}{l}$; c' ist aber $= gt$, also $c : c' = \frac{g\,t\,h}{l} : gt = \frac{h}{l} : 1 = h : l$.

§. 450. Die Zeit des schiefen Falles verhält sich zu der Zeit des senkrechten Falles von derselben Höhe, wie die Länge der schiefen Ebene zu ihrer Höhe.

Es sei t die Zeit, welche der Körper braucht, über die schiefe Ebene zu fallen, und t' die Zeit, welche er braucht, um durch die Höhe der schiefen Ebene frei zu fallen. Nun ist nach §. 446 verbunden mit §. 441 $t = \sqrt{\frac{2l}{g.sin.\alpha}}$, $sin.\alpha = \frac{h}{l}$, also $t = \sqrt{\frac{2l}{g\frac{h}{l}}} = \sqrt{\frac{2l^2}{gh}} = \sqrt{\frac{2l^2h}{gh^2}} = \frac{l}{h}\cdot\sqrt{\frac{2h}{g}}$, und t' nach §. 441 $= \sqrt{\frac{2h}{g}}$; also $t : t' = \frac{l}{h}\cdot\sqrt{\frac{2h}{g}} : \sqrt{\frac{2h}{g}} = \frac{l}{h} : 1 = l : h$.

Digitized by Google

Daraus folgt unmittelbar, daß auf zwei verschieden langen schiefen Ebenen, welche aber eine gleiche Höhe haben, die Zeiten, während welcher die Körper diese Längen zurücklegen, sich verhalten, wie die Längen der schiefen Ebenen.

§. 451. In derselben Zeit, in welcher ein Körper bei dem freien Falle den verticalen Durchmesser eines Kreises durchläuft, kann er auch irgend eine demselben Durchmesser zugehörige Sehne, als schiefe Ebene betrachtet, zurücklegen (d. h. die Sehnen werden gleichzeitig oder isochron durchlaufen).

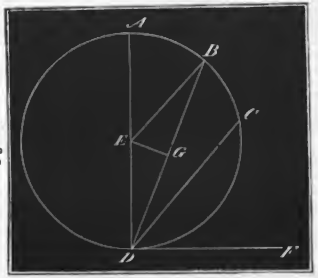


Fig. 133.

Es sei (Fig. 133) $\sphericalangle ADB = \sphericalangle \beta$, dann ist $\sphericalangle BDF$ oder der Neigungswinkel der schiefen Ebene $BD = 90° - \beta$; folglich braucht ein Körper, um über die schiefe Ebene BD sich zu bewegen, eine Zeit $t = \sqrt{\frac{2BD}{g.\ \sin.\ (90° - \beta)}} = \sqrt{\frac{2BD}{g.\ \cos.\ \beta}}$. Nun ist aber $\sphericalangle BED + 2 \sphericalangle BDE = 2R. = 2 \sphericalangle BDE + 2 \sphericalangle BDF$, also auch $\sphericalangle BED = 2 \sphericalangle BDF$, und $\sphericalangle BEG = \sphericalangle GED = \sphericalangle BDF = 90° - \beta$. Da $BG = BE \times \sin.\ BEG = BE \times \sin.\ (90° - \beta) = BE \times \cos.\ \beta$, und ebenso $GD = ED \times \cos.\ \beta = BE \times \cos.\ \beta$ ist, so ist $BG + GD$ oder $BD = 2\ BE \times \cos.\ \beta$, also $t = \sqrt{\frac{4BE \times \cos.\ \beta}{g \times \cos.\ \beta}} = \sqrt{\frac{4BE}{g}} = 2\sqrt{\frac{BE}{g}}$. Eben diesen Ausdruck fände man natürlich auch für jede andere Sehne, z. B. CD. Die Zeit t' nun, welche ein freifallender Körper braucht, um den verticalen Durchmesser AD zu durchfallen, ist nach §. 441 $= \sqrt{\frac{2AD}{g}} = \sqrt{\frac{4BE}{g}} = 2\sqrt{\frac{BE}{g}}$. Da nun $t = 2\sqrt{\frac{BE}{g}}$ war, und t' auch $= 2\sqrt{\frac{BE}{g}}$ ist, so ist $t = t'$.

§. 452. Die wirkliche Bewegung eines schweren Körpers über eine schiefe Ebene weicht noch mehr, als die bei dem freien Fall, von einer gleichförmig beschleunigten Bewegung ab, weil hier zu dem Widerstand des Mittels noch die Reibung auf der Unterlage kommt. Der Widerstand des Mittels ist zwar wegen der geringeren Geschwindigkeit des fallenden Körpers geringer, als bei dem freien Fall, aber die Reibung nimmt in den meisten Fällen einen bedeutenden Theil der Kraft in Anspruch.

§. 453. Gleitet ein Körper über eine stetig krumme Bahn herab, so langt er an ihrem Ende mit derselben Geschwin-

Digitized by Google

digkeit an, als wenn er im freien Fall die ganze Höhe der Bahn zurückgelegt hätte.

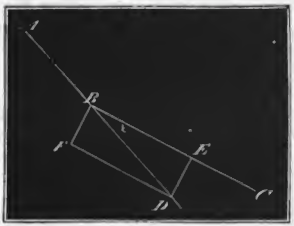


Fig. 134.

Ein Körper bewege sich über die schiefe Ebene AB (Fig. 134) und sei bis B gefallen, die Geschwindigkeit, welche er dadurch erlangt habe, sei = c = BD. Nun gehe er in B auf eine andere schiefe Ebene BC, welche mit AB den Winkel α bildet, über, so leidet er offenbar einen Verlust an seiner Geschwindigkeit. Um diesen Verlust zu bestimmen, zerlege man BD in BF senkrecht auf BC, und BE parallel BC. Er kann sich nun nur noch mit der Geschwindigkeit BE auf BC bewegen, und der Verlust ist demnach BD — BE. BE ist aber = BD $\times$ cos.α, und da BD = c war, so ist der Verlust = c — c $\times$ cos.α = c (1 — cos.α). Die Größe des Verlustes hängt also nur von dem Winkel α ab, er ist desto größer, je größer α ist, weil dann cos.α desto kleiner wird. Ist α = 90°, so ist cos.α = 0, und c (1 — cos.α) = c, d. h. ein senkrecht auf eine Ebene fallender Körper verliert seine ganze Geschwindigkeit. Dieser Verlust wird dagegen verschwindend klein, wenn α unendlich klein ist, weil dann cos.α sich immer mehr dem Werthe 1 und 1 — cos.α dem Werthe 0 nähert. Dieser Fall tritt aber ein bei je zwei auf einander folgenden Punkten einer stetig krummen Bahn.

C. Von dem Stoße der Körper.

§. 454. Wenn ein Körper an eine bewegliche Masse stößt, so erleidet er nicht nur selbst eine Veränderung seiner Bewegung, sondern bewirkt auch eine an der gestoßenen Masse. Die Größe und Beschaffenheit dieser Veränderung hängt von der Richtung der bewegten und zusammenstoßenden Körper, von ihrer Geschwindigkeit, Masse und Gestalt, von ihrer Härte und Weichheit, und dem Grade ihrer Elasticität ab. Der Stoß heißt grade, wenn die Richtung der Bewegung der Körper auf die Ebene, wo sie einander im Anfange des Stoßes berühren, senkrecht ist, sonst heißt er schief. Man nennt ihn central, wenn die Richtung der Körper vor dem Stoße durch den Mittelpunkt ihrer Masse (Schwerpunkt) geht, excentrisch, wenn dies nicht der Fall ist. Bei kugelförmigen, homogenen Körpern, welche hier vorzugsweise betrachtet werden sollen, ist jeder grade Stoß auch ein centraler.

§. 455. Die Veränderung, welche der Stoß eines Körpers in der Geschwindigkeit eines anderen hervorbringt, und selbst erleidet, kann nicht das Werk eines Augenblicks sein, sondern bedarf einer größeren, wenn auch unbemerkbar kurzen Zeit. Wirkt eine Masse auf eine andere zu schnell, als daß sich die Geschwindigkeit in alle Theile bis zu dem gehörigen Grade in rechter Zeit verbreiten könnte, so werden die unmittelbar getroffenen Punkte des gestoßenen Körpers die ganze Gewalt des Stoßes aushalten müssen. Ist der Zusammenhang der Theile nicht groß genug, um dieser Gewalt zu widerstehen, so erfolgt eine Trennung der Theile.

§. 456. Betrachten wir zuerst den graden Stoß unelastischer Körper. Es seien M und m zwei unelastische Massen, welche sich mit der Geschwin-

Digitized by Google

digkeit C und c grade stoßen. Nun ist MC die Größe der Bewegung der ersten, mc die Größe der Bewegung der zweiten Masse (§. 360), und es ist einerlei, ob M mit der Geschwindigkeit C auf m wirkt, oder ob die Kraft, welche der Masse M die Geschwindigkeit C ertheilte, unmittelbar ihre Wirkung auf m äußert. Bewegen sich nun M und m gegen einander, und es ist MC $=$ mc, so ruhen offenbar beide Massen nach dem Stoße. Ist aber MC $>$ mc, so bleibt von den beiden Kräften MC und mc nach dem Stoße noch MC — mc übrig, und diese Kraft muß die Masse M + m nach derjenigen Richtung, welche der Masse M vor dem Stoße eigen war, fortbewegen. Um die Geschwindigkeit x, mit welcher M + m nach dem Stoße sich bewegt, zu finden, haben wir die Gleichung MC — mc $=$ (M + m) x, und es ist also $x = \frac{MC - mc}{M + m}$. Bewegen sich aber beide Massen nach derselben Richtung, so muß die anstoßende Masse M der gestoßenen m Bewegung mittheilen, dadurch verliert sie aber selbst, und zwar so lange, bis beide Massen mit gleicher Geschwindigkeit fortschreiten. Heißt diese Geschwindigkeit x, so ist MC + mc das Maß der Gesammtkraft vor dem Stoße, (M + m) x dasselbe nach dem Stoße, und daher M(C — x) der Verlust an bewegender Kraft bei der Masse M, m(x — c) der Gewinn bei der Masse m, und wir haben die Gleichung M (C — x) $=$ m (x — c), woraus $x = \frac{MC + mc}{M + m}$ gefunden wird. Die eben gefundene Formel stellt alle möglichen Fälle dar, wenn nur c positiv oder negativ genommen wird, je nachdem es mit C der Richtung nach übereinstimmt, oder ihr entgegengesetzt ist, d. h. je nachdem sich beide Massen vor dem Stoße nach derselben oder nach entgegengesetzten Richtungen bewegen.

Ruhte z. B. vor dem Stoße der gestoßene Körper, dann ist c $=$ o, also auch mc $=$ o, und x ist $= \frac{MC}{M + m}$; haben beide Körper gleiche Massen, ist also M $=$ m, dann wird $x = \frac{C + c}{2}$.

§. 457. Sind aber die Körper elastisch, so bestreben sie sich, nachdem sie einander gegenseitig zusammengedrückt, ihre vorige Gestalt wieder anzunehmen; daraus entsteht eine zweite Gegenwirkung des einen auf den anderen, die Geschwindigkeit der Masse M wird noch einmal vermindert, die von m noch einmal vermehrt. Bei vollkommen elastischen Körpern (§. 15) geschieht diese Wiederherstellung der Form mit derselben Kraft, mit welcher die Körper beim Zusammentreffen sich gegenseitig eindrückten, daher dieser zweite Gewinn oder Verlust an Geschwindigkeit bei vollkommen elastischen Körpern dem ersten gleich ist, während er bei unvollkommen elastischen Körpern kleiner sein muß. Denjenigen Theil der zusammendrückenden Kraft, mit welchem der elastische Körper sich wieder ausdehnt, bezeichnet man gewöhnlich mit e, so daß für unvollkommen elastische Körper e $<$ 1 und $>$ o ist. Die Größe von e muß für jeden einzelnen Körper durch Versuche ausgemittelt werden.

§. 458. Setzen wir die gemeinschaftliche Geschwindigkeit, mit welcher beide Körper sich nach dem Stoße bewegen würden, wenn sie unelastisch wären, $=$ v, dann hat der Körper M beim ersten Zusammenstoßen C — v an Geschwindigkeit verloren. Er verliert aber durch die Ausdehnung des elastischen Körpers m noch einmal e (C — v), also beträgt sein ganzer Verlust

Digitized by Google

$C - v + e(C - v) = C - v + eC - ev = (1 + e)(C - v)$, und seine Geschwindigkeit C' nach dem Stoße ist daher $= C - (1 + e)(C - v) = C - (C + eC - v - ev) = v + ev - eC = (1 + e)v - eC$. Substituirt man in diesen Werth von C' statt v aus §. 456 den Werth

$$\frac{MC + mc}{M + m},$$

so ist

$$C' = (1 + e)\frac{MC + mc}{M + m} - eC =$$

$$\frac{MC + mc + eMC + emc - eMC - emC}{M + m} = \frac{MC + mc - em(C - c)}{M + m}.$$

Der andere Körper m hat bei dem Zusammentreffen an Geschwindigkeit gewonnen $v - c$, und gewinnt jetzt noch (wir setzen voraus, daß er mit dem stoßenden Körper von derselben materiellen Beschaffenheit sei) $e(v - c)$, also im Ganzen $v - c + e(v - c) = v - c + ev - ec = (1 + e) \times (v - c)$, demnach ist seine Geschwindigkeit nach dem Stoße $= c + (1 + e) \times (v - c) = c + v + ev - c - ec = v + ev - ec = (1 + e)v - ec$. Substituiren wir auch hier den Werth von v aus §. 456, dann ist

$$c' = (1 + e)\frac{MC + mc}{M + m} - ec = \frac{MC + mc + eMC + emC - eMc - emc}{M + m} = \frac{MC + mc + eM(C - c)}{M + m}.$$

Für vollkommen elastische Körper muß $e = 1$ gesetzt werden, dann ist aber $(1 + e)v = 2v$, $eC = C$ und $ec = c$; nun war $C' = (1 + e)v - eC$, und $c' = (1 + e)v - ec$, diese Werthe werden also zu $C' = 2v - C$ und $c' = 2v - c$. Wird in diese Gleichungen für v jetzt der Werth

$$\frac{MC + mc}{M + m}$$

substituirt, so ist

$$C' = \frac{2MC + 2mc}{M + m} - C =$$

$$\frac{2MC + 2mc - MC - mC}{M + m} = \frac{MC + m(2c - C)}{M + m}$$

und

$$c' = \frac{2MC + 2mc}{M + m} - c = \frac{2MC + 2mc - Mc - mc}{M + m} = \frac{M(2C - c) + mc}{M + m}.$$

Die Differenz der Geschwindigkeiten vor dem Stoße war $C - c$; da nach dem Stoße bei vollkommen elastischen Körpern $C' = 2v - C$, und $c' = 2v - c$, so hat also jetzt der gestoßene Körper die größere Geschwindigkeit, und die Differenz der beiden Geschwindigkeiten ist jetzt $c' - C'$, also $= 2v - c - (2v - C) = 2v - c - 2v + C = -c + C = C - c$, d. h. die Differenz der Geschwindigkeiten nach dem Stoße ist bei vollkommen elastischen Körpern derjenigen vor dem Stoße gleich, aber entgegengesetzt gerichtet.

Für unelastische Körper aber ist $e = 0$, dadurch wird aber auch in dem Werthe für C' das Glied $em(C - c)$ und in dem Werthe für c' das Glied $eM(C - c)$ zu Null, und wir erhalten sowohl für C', als auch für c' den Werth

$$\frac{MC + mc}{M + m},$$

also denselben Werth, den wir auch in §. 456 gefunden hatten.

§. 459. Wir wollen nun noch das im vorhergehenden §. Gefundene auf einige specielle Fälle anwenden. 1) Beide Körper mögen gleiche Masse haben,

Digitized by Google

oder es sei $M = m$, dann ist $C' = \frac{C + c - e(C - c)}{2}$ und $c' = \frac{C + c + e(C - c)}{2}$, und für vollkommen elastische Körper, oder für $e = 1$, $C' = c$ und $c' = C$. 2) Der Körper m sei vor dem Stoße in Ruhe, oder es sei $c = o$, dann ist $C' = \frac{(M - em)\,C}{M + m}$ und $c' = \frac{(M + eM)\,C}{M + m}$, und für vollkommen elastische Körper $C' = \frac{M - m}{M + m} \cdot C$ und $c' = \frac{2MC}{M + m}$. 3) Der Körper m habe nicht bloß vor dem Stoße geruht, sondern sei auch an Masse unendlich groß gegen M, dann kann man $M + m = m$ und $\frac{M}{m} = o$ setzen. Für $c = o$ war aber nach §. 456 $v = \frac{MC}{M + m}$, also ist es jetzt, wenn m für $M + m$ gesetzt wird, $= \frac{M}{m} C = o$; folglich ist $C' = (1 + e)\,v - eC = o - eC = -eC$, und $c' = (1 + e)\,v - ec = o - o = o$. Bei den vollkommen elastischen Körpern ist demnach in diesem Falle $C' = -C$ und $c' = o$. 4) Es sei m unendlich klein gegen M, dann kann man in der Gleichung $v = \frac{MC + mc}{M + m}$ sowohl mc, als m unberücksichtigt lassen, dadurch wird aber $v = \frac{MC}{M} = C$. Ebenso können in der Gleichung $C' = \frac{MC + mc - em(C - c)}{M + m}$ die Werthe mc, em (C—c) und m, und in der Gleichung $c' = \frac{MC + mc + eM(C - c)}{M + m}$ wieder die Werthe mc und m wegen ihrer Kleinheit weggelassen werden, dann ist $C' = \frac{MC}{M} = C$, und $c' = \frac{MC + eM(C - c)}{M} = C + e(C - c)$, und für vollkommen elastische Körper C' auch $= C$ und $c' = 2C - c$. 5) Endlich sollen beide Körper gleiche Masse haben, und der eine derselben vor dem Stoße in Ruhe sein, oder es sei $M = m$ und $c = o$, dann wird aus $v = \frac{MC + mc}{M + m}$ jetzt $v = \frac{MC}{M + M} = \frac{MC}{2M} = \frac{C}{2}$; aus $C' = \frac{MC + mc - em(C - c)}{M + m}$ wird $C' = \frac{MC - eMC}{2M} = \frac{C - eC}{2} = \frac{1 - e}{2} C$ und aus $c' = \frac{MC + mc + eM(C - c)}{M + m}$ wird $c' = \frac{MC + eMC}{2M} = \frac{C + eC}{2} = \frac{1 + e}{2} C$. Sind noch dazu beide Körper vollkommen elastisch, also auch $e = 1$, dann ist $C' = o$ und $c' = C$.

Digitized by Google

§. 460. Man nennt das Produkt einer Masse in das Quadrat ihrer Geschwindigkeit ihre lebendige Kraft (früher unterschied man nämlich unter todten und lebendigen Kräften, je nachdem die Kräfte im Gleichgewichte waren, oder Bewegung hervorbrachten).

Für vollkommen elastische Körper ist die Summe der lebendigen Kräfte vor und nach dem Stoße gleich.

Nach §. 458 ist $C' = 2v - C$, also $C'^2 = 4v^2 - 4vC + C^2$ und $MC'^2 = 4Mv^2 - 4MvC + MC^2$. Ebenso ist $c' = 2v - c$ (§. 458), also $c'^2 = 4v^2 - 4vc + c^2$ und $mc'^2 = 4mv^2 - 4mvc + mc^2$. Folglich ist $MC'^2 + mc'^2 = 4Mv^2 + 4mv^2 - 4MvC - 4mvc + MC^2 + mc^2 = 4v^2 \times (M + m) - 4v(MC + mc) + MC^2 + mc^2 = 4v[v(M + m) - (MC + mc)] + MC^2 + mc^2$. Nach §. 456 ist $v = \frac{MC + mc}{M + m}$, also $v(M + m) = MC + mc$, also $v(M + m) - (MC + mc) = o$, also ist auch $4v[v(M + m) - (MC + mc)] = o$ und $MC'^2 + mc'^2 = MC^2 + mc^2$.

§. 461. Um die Uebereinstimmung der Gesetze des geraden und centralen Stoßes mit der Erfahrung zu prüfen, bedient man sich der sogen. Percussionsmaschine. Das Wesentlichste dieses Apparates besteht in mehreren, an gleich langen Fäden hangenden Kugeln, welche einander berühren, und deren Mittelpunkte in derselben Höhe liegen. Hinter ihnen befindet sich ein Kreisbogen, welcher von seinem untersten Punkte angefangen nach Aufwärts zu beiden Seiten in Grade getheilt ist. Zu Versuchen über den Stoß fester unelastischer Körper nimmt man Massen aus trocknem Thon oder Mehlteig, für elastische wählt man gewöhnlich Elfenbein. Hängt man mehrere elastische Kugeln von gleichem Durchmesser neben einander, hebt dann eine gewisse Anzahl auf, und läßt sie zugleich herabfallen, damit sie an die übrigen anstoßen, so fliegen auf der entgegengesetzten Seite grade so viele weg, als auf der anderen aufgehoben wurden. Der Grund dieser Erscheinung liegt in §. 459, 5.

§. 462. Bei dem Stoße einer vollkommen elastischen Kugel gegen eine feste Ebene, deren Lage unverrückbar ist, ist der Einfallswinkel dem Zurückwerfungswinkel gleich.

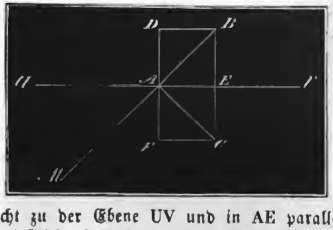


Fig. 135.

UV (Fig. 135) sei die feste Ebene, und in M befinde sich eine vollkommen elastische Kugel, welche in der Richtung MA gegen UV gestoßen wird. Wenn die Kugel in A angekommen ist, so denke man sich die Kraft, durch welche sie in Bewegung gesetzt wurde, und welche durch AB vorgestellt werde, in zwei Seitenkräfte zerlegt, in AD senkrecht zu der Ebene UV und in AE parallel mit UV. Wäre nun die Kugel unelastisch, so würde die senkrechte Seitenkraft AD durch die Festigkeit der Ebene aufgehoben, und die Kugel würde sich mit der Kraft AE längs AV bewegen. Da aber die Kugel als elastisch vorausgesetzt wurde, so erleidet sie eine Zusammendrückung, und ihre Form stellt sich mit der Kraft AD wieder her. Dadurch erhält die Kugel einen Stoß in entgegengesetzter Richtung nach AF = AD. Demnach wirken jetzt die beiden Kräfte AF und AE auf die

Digitized by Google

Kugel. Zeichnet man also das Parallelogramm AECF, so gibt die Diagonale AC die Richtung der Bewegung der Kugel an. Es ist aber △ AEB ≅ △ AEC, folglich ∢EAC = ∢BAE = ∢UAM, also auch ∢MAF = ∢FAC.

§. 463. Den Punkt zu bestimmen, in welchem eine vollkommen elastische Kugel gegen eine feste Ebene gestoßen werden muß, um nach der Zurückwerfung einen gegebenen Punkt zu treffen.

Die Kugel befinde sich in M (Fig. 135), und soll nach der Zurückwerfung von der Ebene UV den Punkt C treffen. Dann ziehe man aus C die senkrechte CE auf UV, verlängere sie bis B, so daß BE = CE, und ziehe die gerade Linie BM. Diese schneidet alsdann die UV in dem gesuchten Punkte A.

§. 464. Wenn zwei in Bewegung befindliche, vollkommen elastische Kugeln schief gegen einander stoßen, sollen die Richtungen bestimmt werden, in welchen sich beide nach dem Stoße bewegen.

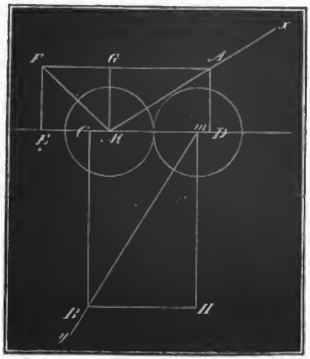


Fig. 136.

Es seien M und m (Fig. 136) die Kugeln, von welchen die eine die Richtung Mx und die andere die Richtung my hat, so daß sie im Anfange des Stoßes die in der Figur gezeichnete Lage gegen einander haben. MA und mB seien die Geschwindigkeiten der Kugeln vor dem Stoße. Man ziehe durch die Mittelpunkte M und m die grade Linie CD, zerlege MA in die auf CD senkrechte MG und in die mit ihr parellele MD, und ebenso mB in mC und mH. Nun bewirken die Kräfte mC und MD einen graden Stoß, während mH und MG gar Nichts zu dem Stoße beitragen. Erlangt M durch den Stoß die Geschwindigkeit ME, so setze man ME mit MG zusammen, und es gibt alsdann die Resultirende MF derselben die Richtung der Kugel M nach dem Stoße an. Auf gleiche Weise findet man auch die Richtung der Kugel m nach dem Stoße.

D. Von der krummlinigen Bewegung.

§. 465. Gesetzt, zwei momentane Kräfte wirken zu gleicher Zeit in verschiedenen Richtungen auf einen ruhenden materiellen Punkt, so wird bekanntlich die Bewegung des Punktes nach Richtung und Geschwindigkeit durch die Diagonale des Parallelogramms, welches aus den durch Linien vorgestellten Kräften construirt werden kann, bestimmt. Der Punkt muß sich in der angegebenen Richtung und mit unveränderter Geschwindigkeit so lange fortbewegen, bis eine neue Kraft auf ihn wirkt. Seine Bewegung ist also constant und gradlinig. Wenn nun eine dritte Kraft auf den schon in Bewegung begriffenen Punkt einwirkt, so wird sich dieselbe mit der Mittelkraft der zwei ersten Kräfte so zusammensetzen lassen, wie wenn sie den Punkt in Ruhe vorgefunden hätte. Der Punkt wird zwar seine Richtung und seine Geschwindigkeit ändern, aber

Digitized by Google

in dieſer veränderten Richtung und zwar mit conſtanter Geſchwindigkeit fortgehen, bis abermals eine neue Kraft auf ihn einwirkt. Läßt man alſo beliebig viele Kräfte nach einander in beliebigen Zeitintervallen, und nach immer anderen und anderen Richtungen auf den Punkt wirken, ſo wird derſelbe ein gradliniges Polygon, aber keine krumme Linie beſchreiben. Je kleiner indeß die Zeitintervalle zwiſchen den auf einander folgenden Wirkungen der Kräfte ſind, deſto mehr nähert ſich das beſchriebene Polygon einer krummen Linie, und geht in der That in eine ſolche über, wenn dieſe Intervalle unendlich klein angenommen werden. Dann kommt aber die Wirkung der Kräfte mit der Wirkung einer continuirlichen Kraft überein. Um eine krummlinige Bewegung hervorzubringen, iſt alſo erforderlich, daß eine ſtetige Kraft auf einen ſchon durch eine momentane Kraft in Bewegung geſetzten Punkt in einer von der Richtung der momentanen Kraft verſchiedenen Richtung einwirkt. Von dem Verhältniß dieſer beiden Kräfte und von den Richtungen, in welchen ſie wirken, hängt dann die verſchiedene Natur der Curve ab, welche der Punkt beſchreiben wird.

§. 466. Unter den krummlinigen Bewegungen iſt eine der einfachſten die Wurfbewegung. Man verſteht darunter diejenige Bewegung, welche ein Punkt erhält, der durch eine momentane Kraft in einer gegen den Horizont unter einem beliebigen Winkel geneigten Richtung fortgeſchleudert wird, während er in jedem Punkte ſeiner Bahn durch eine ſtetige Kraft ſenkrecht gegen den Horizont getrieben wird. Der von dem Punkte beſchriebene Weg heißt die Wurflinie, der Winkel, welchen die momentane Kraft mit dem Horizonte macht, der Neigungs- oder Elevationswinkel. Man ſieht leicht, daß die ſtetige Kraft in der Wirklichkeit die Schwerkraft iſt, welche überall vertical auf den Horizont wirkt.

Zwei Fälle der Wurfbewegung, nämlich der Fall, wenn ein Körper vertical niederwärts, und der Fall, wenn ein Körper vertical aufwärts geworfen wird, gehören gar nicht zu der krummlinigen Bewegung, weil die Richtungen der Kräfte dann keinen Winkel einſchließen, und ſind auch ſchon in §. 445 abgehandelt worden.

§. 467. Wird ein ſchwerer Körper horizontal geworfen, ſo beſchreibt er eine Parabel, deren Axe vertical ſteht.

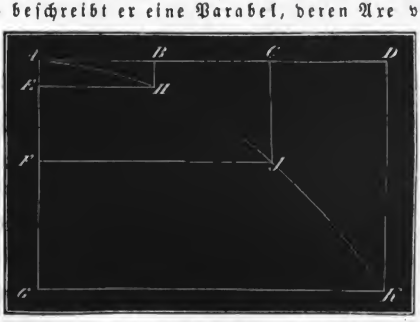


Fig. 137.

Geſetzt der Körper lege vermöge der Wurfkraft in irgend einer beliebigen Zeit den Weg AB (Fig. 137), in 2 ſolchen Zeiten den Weg AC, in 3 den Weg AD u. ſ. w. zurück, wenn ihn die Schwere nicht abwärts zöge; dagegen lege er, wenn nur die Schwerkraft auf ihn einwirkte, in der erſten Zeit den Weg AE, in den zwei erſten den Weg AF, in den drei erſten den Weg AG u. ſ. w. zurück. Wenn nun beide Kräfte gleichzeitig auf ihn einwirken, ſo muß er nach Verlauf

Digitized by Google

der ersten Zeiteinheit in H, nach Verlauf der zweiten in J, nach Verlauf der dritten in K u. s. w. sich befinden, er muß mithin den Weg AHJK zurücklegen. Es ist aber EH : FJ : GK : u. s. w. = 1 : 2 : 3 : u. s. w., also $EH^2 : FJ^2 : GK^2 = 1 : 4 : 9$; es ist aber auch AE : AF : AG = 1 : 4 : 9 (§. 439), folglich $EH^2 : FJ^2 : GK^2 = AE : AF : AG$. Da aber nur bei der Parabel sich die Quadrate der Ordinaten wie die zugehörigen Abscissen verhalten, so muß AHJK eine Parabel sein.

§. 468. Auch wenn ein Körper schief gegen den Horizont geworfen wird, ist die Bahn des geworfenen Körpers eine Parabel mit verticaler Axe.

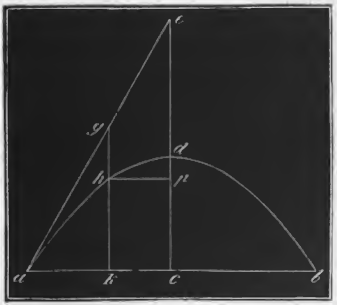


Fig. 138.

Der Körper werde in der schiefen Richtung ae (Fig. 138), welche mit dem Horizonte ab den Winkel eab = α macht, und mit der Anfangsgeschwindigkeit c geworfen. Mit der Geschwindigkeit c würde er bei gleichförmiger Bewegung in der Zeit t einen Weg ct zurücklegen. Dieser Weg sei ag. ag läßt sich in die horizontale ak und in die verticale kg zerlegen. Vermöge ak wird also der Körper in der Zeit t den Weg ak = ct. cos. α zurückgelegt haben, und vermöge kg würde er in der Zeit t den Weg gk = ct. sin. α durchlaufen, wenn nicht die stetige Kraft der Schwere diese Bewegung verminderte. Vermöge der Schwerkraft nämlich wird der Körper in der Zeit t um den Raum $gh = \frac{1}{2} gt^2$ in der Richtung gk bewegt, daher legt er in der Zeit t in verticaler Richtung nur den Weg kh = gk — gh = ct. sin. α — $\frac{1}{2} gt^2$ zurück. Für die Stelle b, wo der geworfene Körper den horizontalen Boden wieder erreicht, wird kh = o, folglich ct. sin. α — $\frac{1}{2} gt^2$ = o, ct. sin. α = $\frac{1}{2} gt^2$, c. sin. α = $\frac{1}{2} gt$ und $t = \frac{c. \sin. \alpha}{\frac{1}{2} g}$. Setzt man diesen Werth für t in den Werth für ak, welches sich für die Stelle b in ab verwandelt, so erhält man ab oder die Weite des Wurfs $= \frac{c^2. \sin. \alpha . \cos. \alpha}{\frac{1}{2} g} = \frac{2c^2. \sin. \alpha . \cos. \alpha}{g} = \frac{c^2. \sin. 2\alpha}{g}$. Für die Stelle d, wo der Körper die größte Höhe über dem Horizonte erreicht, oder wo kh ein Maximum wird, muß nach der Differentialrechnung d. kh = c. sin. α. dt — gt. dt = o sein. Daraus folgt $t = \frac{c. \sin. \alpha}{g}$, also halb so groß, als für die Stelle b. Setzt man diesen Werth in die Formel für ak, welches in diesem Falle zu ac wird, so ist $ac = \frac{c^2. \sin. \alpha . \cos. \alpha}{g} = \frac{1}{2}$ ab, und setzt man es auch in die Formel für kh, welches zu cd wird, so ist $cd = \frac{c^2. \sin. \alpha^2}{g} - \frac{c^2. \sin. \alpha^2}{2g} =$

Digitized by Google

$= \frac{c^2 . \sin. \alpha^2}{2g}$. Nun ist $dp = dc - pc = dc - hk = \frac{c^2 . \sin. \alpha^2}{2g} -$ $ct . \sin. \alpha + \frac{1}{2} gt^2$, und $hp = ac - ak = \frac{c^2 . \sin. \alpha . \cos. \alpha}{g} - ct . \cos. \alpha$, also $hp^2 = \frac{c^4 . \sin. \alpha^2 . \cos. \alpha^2}{g^2} - \frac{2c^3 . \sin. \alpha . \cos. \alpha^2 . t}{g} + c^2 t^2 . \cos. \alpha^2$ $= \frac{c^2 . \cos. \alpha^2}{g} (\frac{c^2 . \sin. \alpha^2}{g} - 2ct . \sin. \alpha + gt^2) = \frac{2c^2 . \cos. \alpha^2}{g}$ $(\frac{c^2 . \sin. \alpha^2}{2g} - ct . \sin. \alpha + \frac{1}{2} gt^2) = \frac{2c^2 . \cos. \alpha^2}{g} . dp$; folglich ist adb eine Parabel, deren Scheitel d und deren verticale Axe dc ist.

§. 469. Da im vorhergehenden §. die Wurfweite $= \frac{c^2 . \sin. 2\alpha}{g}$ gefunden wurde, so geht daraus hervor, daß sie bei gleichem Elevationswinkel dem Quadrate der Anfangsgeschwindigkeit, und bei gleicher Anfangsgeschwindigkeit dem Sinus des doppelten Elevationswinkels proportional ist. Da nun von allen Sinus sin. 90° am größten ist, so ist also in letzterem Falle die Wurfweite am größten für den Elevationswinkel von 45° Ferner ist sie für Elevationswinkel, welche gleich viele Grade über und unter 45° liegen, gleich, weil $\sphericalangle 2 (45° - \beta)$ und $\sphericalangle 2 (45° + \beta)$ als Nebenwinkel gleiche Sinus haben.

§. 470. Die größte Wurfhöhe war in §. 468 gefunden $= \frac{c^2 . \sin. \alpha^2}{2g}$, sie ist demnach, wie die Wurfweite, bei gleichem Elevationswinkel dem Quadrate der Anfangsgeschwindigkeit, aber bei gleicher Anfangsgeschwindigkeit dem Quadrate des Sinus des Elevationswinkels proportional. Da ferner gezeigt wurde, daß $ac = \frac{1}{2} ab$ war, so findet sich demnach die größte Wurfhöhe in der halben Wurfweite. Für die Stelle b, wo der geworfene Körper den horizontalen Boden wieder erreicht, war die Zeit $t = \frac{c . \sin. \alpha}{\frac{1}{2} g}$, und für die Stelle d, wo der Körper zur größten Höhe über dem Horizonte aufgestiegen war, war die Zeit $= \frac{c . \sin. \alpha}{g}$; es folgt also daraus, daß die Zeit der größten Wurfhöhe halb so groß ist, als die Zeit der größten Wurfweite.

§. 471. Die Geschwindigkeit in der größten Wurfhöhe ist, wenn die Anfangsgeschwindigkeit c in eine horizontale und eine verticale Seitengeschwindigkeit zerlegt wird, der horizontalen Seitengeschwindigkeit gleich.

Wird die Anfangsgeschwindigkeit zerlegt, so ist die horizontale Seitengeschwindigkeit $= c . \cos. \alpha$, und die verticale $= c . \sin. \alpha$. Die erstere bleibt beständig dieselbe, die letztere dagegen wird von der stetig wirkenden Schwerkraft vermindert, und zwar nach t Secunden um die dieser Zeit zukommende Endgeschwindigkeit gt, sie ist also nach t Secunden $= c . \sin. \alpha - gt$, während die horizontale immer noch $= c . \cos. \alpha$ ist. Setzt man diese beiden zusammen, so erhält man die mittlere Geschwindigkeit nach t Secunden; diese ist aber die Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks, dessen Katheten $c . \cos. \alpha$ und $c . \sin. \alpha - gt$ sind, folglich ist sie $= \sqrt{(c . \cos. \alpha)^2 + (c . \sin. \alpha - gt)^2} =$

Digitized by Google

$\sqrt{(c^2.\cos.\alpha^2+c^2.\sin.\alpha^2-2cgt.\sin\alpha+g^2t^2)}=\sqrt{((\cos.\alpha^2+\sin.\alpha^2)\times c^2+g^2t^2-2cgt.\sin.\alpha)}=\sqrt{(c^2+g^2t^2-2cgt.\sin.\alpha)}$. t wird aber für die größte Wurfweite zu $\frac{c.\sin.\alpha}{g}$. Setzen wir diesen Werth für t in den eben gefundenen Ausdruck, so ist die Geschwindigkeit in der größten Wurfhöhe $=\sqrt{(c^2+g^2.\frac{c^2.\sin.\alpha^2}{g^2}-2cg.\frac{c.\sin.\alpha}{g}.\sin.\alpha)}=\sqrt{(c^2+c^2.\sin.\alpha^2-2c^2.\sin.\alpha^2)}=\sqrt{(c^2-c^2.\sin.\alpha^2)}=\sqrt{c^2(1-\sin.\alpha^2)}=\sqrt{c^2.\cos.\alpha^2}=c.\cos.\alpha$.

§. 472. Die Endgeschwindigkeit in der Wurfweite ist genau so groß wie die Anfangsgeschwindigkeit.

Nach §. 471 ist die mittlere Geschwindigkeit nach der Zeit $t=\sqrt{(c^2+g^2t^2-2cgt.\sin.\alpha)}$. Für die größte Wurfweite ist aber $t=\frac{c.\sin.\alpha}{\frac{1}{2}g}$. Wird dieser Werth für t substituirt, so ist die Endgeschwindigkeit in der Wurfweite $=\sqrt{(c^2+g^2.\frac{c^2.\sin.\alpha^2}{\frac{1}{4}g^2}-2cg.\frac{c.\sin.\alpha}{\frac{1}{2}g}\sin.\alpha)}=\sqrt{(c^2+4c^2.\sin.\alpha^2-4c^2.\sin.\alpha^2)}=\sqrt{c^2}=c$.

§. 473. Die höchste Höhe, welche der geworfene Körper erreicht, ist die Hälfte von der Höhe, welche er vermöge der momentan wirkenden Kraft allein in derselben Zeit erreichen würde.

In der Zeit t würde der Körper durch alleinige Einwirkung der momentanen Kraft den Weg ct zurücklegen. Der Endpunkt dieses zurückgelegten Weges erhebt sich aber über den Horizont um $ct.\sin.\alpha$. Für die höchste Wurfhöhe ist aber nach §. 468 $t=\frac{c.\sin.\alpha}{g}$. Wird dieser Werth substituirt, so ist die Höhe, welche der Körper vermöge der momentan wirkenden Kraft allein zur Zeit der höchsten Wurfhöhe erreicht haben würde, $=\frac{c^2.\sin.\alpha^2}{g}$. Die größte Wurfhöhe ist aber nach §. 468 $=\frac{c^2.\sin.\alpha^2}{2g}$, also halb so groß.

§. 474. Die Elemente der Bewegung eines geworfenen Körpers werden durch den Widerstand der Luft, oder überhaupt des Mittels, in welchem die Bewegung erfolgt, bedeutend afficirt; Wurfweite und Wurfhöhe sind kleiner, als sie die gefundenen Formeln angeben. Die Wurfweite ist nicht bei einem Elevationswinkel von 45° am größten, wie die Theorie lehrt, sondern bei einem kleineren Winkel (28°—42°). Die beiden Aeste der Parabel, welche der Körper bei dem schiefen Wurfe beschreibt, sind in der Luft nicht mehr einander gleich, wie dieses im leeren Raum der Fall wäre, sondern es ist der absteigende Arm mehr gekrümmt, als der aufsteigende; die ganze Bahn selbst ist nicht mehr eine Parabel, wie es die Theorie fordert.

§. 475. Die bisher betrachteten Gesetze des Wurfes beruhen auf der Bedingung, daß innerhalb der Wurfweite die Richtungen der Schwere parallel bleiben. Offenbar ist dieses nur annäherungsweise wahr, weil die Schwere immer nach dem Mittelpunkt der Erde hinzieht; doch kann man ihre Richtungen für die uns zu Gebote stehenden Wurfkräfte bei irdischen Körpern im-

Digitized by Google

mer ohne merklichen Fehler für einander parallel annehmen. Werden aber die Gesetze der Schwere auf die Himmelskörper übertragen, so kann von jener Voraussetzung überhaupt nicht die Rede sein. Wird nämlich ein völlig freier Körper von einer ununterbrochen nach demselben Punkte wirkenden Kraft gezogen, während er durch eine andere, momentan wirkende Kraft eine seitwärts gehende Bewegung erhalten hat, so entsteht eine Centralbewegung. Die beiden wirkenden Kräfte heißt man Centralkräfte. Die stetig wirkende Kraft heißt die Centripetalkraft, und der Punkt, nach welchem sie zielt, der Centralpunkt. Wenn in irgend einem Punkte der Bahn die Einwirkung der stetigen Kraft plötzlich unterbrochen würde, so müßte der bewegte Körper wegen seines Beharrungsvermögens mit constanter Geschwindigkeit in derjenigen Richtung fortgehen, welche er in diesem Punkte erhalten hatte; diese Richtung ist aber offenbar die in diesem Punkte an die beschriebene Curve zu legende Tangente. Diejenige Kraft nun, welche, wenn sie allein auf den Punkt wirkte, diese Bewegung hervorbrächte, heißt die in diesem Punkte der Bahn wirkende Tangentialkraft. Die bei jeder Centralbewegung mitwirkende momentane Kraft ist offenbar die Tangentialkraft des Anfangspunktes der Bewegung. Jede grade Linie von dem Mittelpunkte der Bewegung, dem Centralpunkte, nach irgend einem Punkte der Bahn gezogen, heißt der Radius Vector des Punktes, und der zwischen 2 Radien Vectoren und dem dazwischen liegenden Bogen der krummlinigen Bahn begrenzte Ausschnitt heißt der von dem Radius Vector beschriebene Sector.

Es ist klar, daß die Natur der Curve, welche der bewegte Körper beschreibt, von dem Verhältniß der beiden Kräfte zu einander, dann aber auch insbesondere von der Wirkungsweise der Centripetalkraft abhängt, ob nämlich die Wirkung dieser Kraft unverändert dieselbe bleibe, oder ob sie sich ändere. Ist Letzteres der Fall, so kann sie entweder zu- oder abnehmen, oder eine Zeit lang zunehmen und dann wieder abnehmen. So z. B. werden die Planeten in den Theilen ihrer Bahnen, in welchen sie weiter von der Sonne entfernt sind, von dieser auch mit geringerer Kraft angezogen.

§. 476. Bei jeder Centralbewegung verhalten sich die von den Radien Vectoren beschriebenen Flächenräume wie die Zeiten, in welchen sie beschrieben werden.

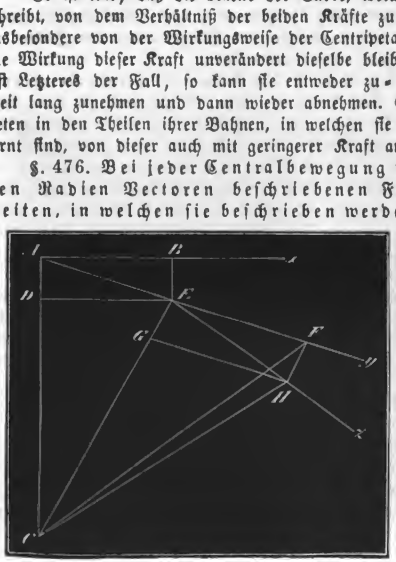


Fig. 139.

Es wirke die Centripetalkraft auf einen Körper A in der Richtung AC (Fig. 139), die Tangentialkraft in der Richtung Ax, und man nehme an, daß die Centripetalkraft nicht ununterbrochen wirke, sondern daß eine Wirkung auf die andere in der Zeit τ folge, ferner daß das Bewegliche in der Zeit τ in Folge des Impulses der Tangentialkraft, oder, insofern es bereits in Bewegung ist, bloß wegen seiner Trägheit den Weg AB

Digitized by Google

zurücklege, durch alleinige Wirkung der Centripetalkraft aber den Weg AD; so kommt es durch die gleichzeitige Wirkung beider in derselben Zeit nach E, wenn AE die Diagonale des Parallelogramms ABED ist. Wenn hier keine fernere Wirkung der Centripetalkraft erfolgte, so würde das Bewegliche in der graden Linie Ay fortgehen, und in der Zeit τ wieder den Weg EF = AE, zurücklegen. Weil aber in E wieder die Wirksamkeit der Centripetalkraft eintritt, vermöge welcher das Bewegliche in der Zeit τ den Weg EG beschriebe, wenn es nicht schon in E eine Bewegung hätte, so muß es nach H kommen. Hier tritt wieder derselbe Fall ein, wie in E, und so geht es weiter, so daß es klar genug ist, der Weg des Körpers könne keine gerade Linie sein, sondern bei der Voraussetzung einer stoßweise erfolgenden Wirkung der Centripetalkraft ein in der Ebene der Richtungen der Kräfte liegendes Polygon, welches sich aber einer continuirlich krummen Linie desto mehr nähert, je kleiner τ ist. Stellt man sich τ unendlich klein vor, d. h. läßt man die Centripetalkraft ununterbrochen wirken, so wird der Weg wirklich eine krumme Linie. Man ziehe noch die gerade Linie FC. Nun ist $\triangle$ ACE = $\triangle$ ECF, weil sie auf gleichen Grundlinien stehen und gleiche Höhe haben. Ferner ist $\triangle$ ECF = $\triangle$ ECH, weil EC || FH ist. Folglich ist auch $\triangle$ ACE = $\triangle$ ECH. Da sich dieses von je zwei solchen benachbarten Dreiecken nachweisen läßt, und sonach je zwei Sectoren, welche der von dem Centralpunkte zum Beweglichen gehende Radius Vector in gleichen Zeiten durchstreicht, als Summen gleicher Mengen gleich großer Dreiecke betrachtet werden können, so ergibt sich die Folgerung, daß bei einer durch Centralbewegung beschriebenen Bahn der Radius Vector in gleichen Zeiten gleiche Flächenräume durchwandert, oder, was dasselbe heißt, daß die von dem Radius Vector beschriebenen Flächenräume den Zeiten, in welchen sie beschrieben werden, proportionirt sind.

Der eben erwiesene Satz ist unter dem Namen des zweiten Keppler'schen Gesetzes bekannt. Der Keppler'schen Gesetze sind es aber drei. Das erste besagt, daß die Planeten um die Sonne und die Monde um die Planeten elliptische Bahnen beschreiben, und das dritte wird §. 483 noch besprochen werden. Keppler hat sie im Mai 1618 durch die Beobachtung der Bewegung unserer Erde und der Planeten um die Sonne gefunden, ihre mathematische Begründung erhielten sie jedoch erst durch Newton, welcher zeigte, daß sie nothwendige Folgen der Gesetze der allgemeinen Gravitation seien. Die Kenntniß der Keppler'schen Gesetze ist um so wichtiger, als sie die Hauptstützen der ganzen neueren Astronomie geworden sind.

Es besteht also bei der Centralbewegung eine Art Gleichförmigkeit, zwar nicht in Betreff der Wege, welche das Bewegliche zurücklegt, aber hinsichtlich der Flächenräume, welche der von dem Centralpunkt ausgehende Radius Vector durchstreicht. Man nennt diese Eigenschaft der Centralbewegung die Erhaltung der Flächen.

§. 477. Läßt sich bei der Bewegung eines freien Körpers in einer krummen Bahn ein Punkt angeben von der Beschaffenheit, daß der von ihm zu dem Körper gehende Radius Vector in gleichen Zeiten gleiche Sectoren durchläuft, so ist, vorausgesetzt, daß die Bahn dem genannten Punkte ihre hohle Seite zukehrt, die Bewegung des Körpers eine Centralbewegung.

Digitized by Google

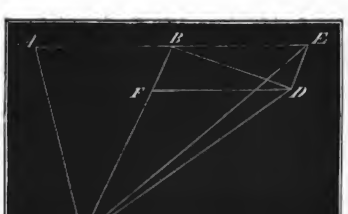


Fig. 140.

Es seien AB und BD (Fig. 140) zwei unendlich kleine, in unmittelbar auf einander folgenden gleichen Zeiten beschriebene Stücke der Bahn des Beweglichen, von welchen das zweite von der Richtung des ersten abweicht. Verlängert man AB bis E, so daß BE = AB wird, zieht man ED, und macht BF ∥ ED, so zeigt BF die Richtung und Größe des Weges an, welchen das Bewegliche vermöge der Kraft, welche es von seiner ursprünglichen Richtung ablenkte, in derselben Zeit beschrieben hätte, wenn es dieser Kraft ausschließend hätte folgen können. Ist nun C ein Punkt, für welchen die Dreiecke ABC und BCD gleiche Flächen haben, so muß auch △ BCD = △ BCE sein, weil beide = △ ACB sind. Ist aber △ BCD = △ BCE, so muß BC ∥ ED sein. Es kann also BF, welches gleichfalls ∥ ED ist, keine andere Richtung haben, als eine solche, welche durch den Punkt C hindurchgeht. Die Bewegung des Körpers ist also eine Centralbewegung.

Aus unserem Satze folgt demnach auch, daß die Erhaltung der Flächen eine Eigenschaft ist, welche der Centralbewegung ausschließend zukommt.

§. 478 Bei der Centralbewegung verhalten sich die Geschwindigkeiten in verschiedenen Punkten der Bahn umgekehrt wie die senkrechten graden Linien, welche von dem Centralpunkte auf die Tangenten gezogen werden, die die Bahn in den gegebenen Punkten berühren.

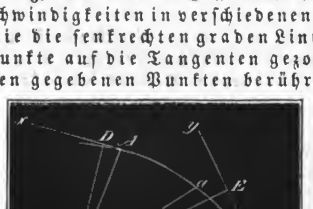


Fig. 141.

Ein Körper bewege sich in der Curve AB (Fig. 141), und zwar durch Einwirkung von Centralkräften. Der Körper komme in einem Zeittheilchen, welches als sehr klein angenommen wird von A nach a, und in einem gleich großen Zeittheilchen von B nach b, so sind die Wege Aa und Bb den Geschwindigkeiten in den Punkten A und B proportional. Zieht man nun nach dem Centralpunkt C die graden Linien AC, aC, BC und bC, so ist △ ACa = △ BCb. Sind Ax und By Tangenten in A und B an die Curve, so ist △ ACa = ½ Aa × CD, und △ BCb = ½ Bb × CE. Es ist also Aa × CD = Bb × CE, oder es verhält sich Aa : Bb = CE : CD.

§. 479. Bei einer Kreisbewegung, deren Centralpunkt mit dem Mittelpunkt des Kreises zusammenfällt, erfolgt die Bewegung mit constanter Geschwindigkeit.

Für den angeführten Fall würde nämlich CE mit BC, und CD mit AC zusammenfallen, und als Radien einander gleich sein, also müßte auch Aa = Bb sein.

Digitized by Google

Der Satz folgt auch schon aus §. 476, denn beim Kreise verhalten sich die Sectoren wie ihre Bögen. Da sich nun die Sectoren wie die Zeiten verhalten, so müßten sich auch die Bögen oder die zurückgelegten Wege wie die Zeiten verhalten, die Geschwindigkeit müßte also constant sein.

§. 480. Jede Centralbewegung, welche mit constanter Geschwindigkeit erfolgt, ist kreisförmig, und zwar muß der Centralpunkt mit dem Mittelpunkte des Kreises zusammenfallen.

Der Kreis hat bekanntlich von allen bekannten Curven allein die Eigenschaft, daß sich bei ihm die Sectoren verhalten wie die zugehörigen Bögen, und zwar findet dies bei dem Kreise auch nur für Sectoren von dem Mittelpunkt statt.

Aus diesem Satze folgt noch unmittelbar, daß jede Centralbewegung, welche keine Kreisbewegung ist, sowie auch jede excentrische Kreisbewegung, mit veränderlicher Geschwindigkeit erfolgt.

§. 481. Je weiter sich bei der Centralbewegung der Körper auf seiner Bahn von dem Centralpunkte entfernt, desto kleiner wird seine Geschwindigkeit, und je näher er sich diesem Centralpunkte befindet, desto größer ist seine Geschwindigkeit.

Denn da die in gleichen Zeiten beschriebenen Sectoren einander gleich sind, so haben sie nothwendig in der Nähe des Centrums der Bewegung größere Bögen, als in denjenigen Theilen der Bahn, welche weiter von diesem Centrum entfernt sind; also sind die in gleichen Zeiten beschriebenen Wege dort größer, als hier.

§. 482. Bei der Kreisbewegung eines Punktes ist die Centripetalkraft dem Quadrate der Geschwindigkeit direct, und dem Durchmesser des beschriebenen Kreises umgekehrt proportional.

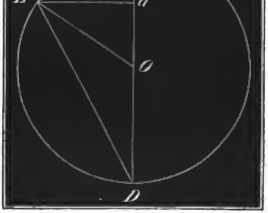


Fig. 142.

Da nach §. 479 die Kreisbewegung, deren Centralpunkt mit dem Mittelpunkt des Kreises zusammenfällt, mit constanter Geschwindigkeit erfolgt, so muß, wenn c die Geschwindigkeit ist, der Bogen AB (Fig. 142), welcher in der Zeit t beschrieben wird, $=$ ct sein. Um aber die Wirkung einer stetigen Kraft zu erhalten, muß der Bogen, welcher zwischen je zwei Einwirkungen dieser Kraft von dem bewegten Punkte beschrieben wird, unendlich klein angenommen werden, dergestalt, daß der Bogen AB der Sehne AB gleichgesetzt werden kann. Nun ist $\triangle$ ABa $\sim$ $\triangle$ ABD, folglich AB : Aa $=$ AD : AB oder ct : Aa $=$ 2r : ct, also $Aa = \frac{c^2 t^2}{2r}$.

Es ist aber Aa der Weg, welchen der Körper vermöge der alleinigen Einwirkung der Centripetalkraft in der Zeit t zurücklegen würde.

Da in unserem Falle die Centralkraft eine constante Kraft ist, so ist offenbar, wenn man die Acceleration derselben oder die Endgeschwindigkeit

Digitized by Google

der ersten Secunde $= \gamma$ setzt (§. 437), Aa auch $= \frac{1}{2}\gamma t^2$, folglich $\frac{1}{2}\gamma t^2 = \frac{c^2 t^2}{2r}$, woraus die Acceleration $\gamma = \frac{c^2}{r}$ gefunden wird.

Wenn bei unserer Voraussetzung m die Masse des Beweglichen und p die Größe der Centripetalkraft ist, so ist p, da jede Kraft gemessen wird durch das Produkt aus der Masse in die Geschwindigkeit, $= m\gamma = m.\frac{c^2}{r} = \frac{mc^2}{r}$.

§. 483. Wenn sich die Centralkräfte grade wie die Massen und umgekehrt wie die Quadrate der Entfernungen verhalten, so verhalten sich die Quadrate der Umlaufszeiten wie die Würfel der Entfernungen.

Heißt die Zeit, in welcher ein Umlauf im Kreise gemacht wird, t, und ist c die Geschwindigkeit der constanten Kreisbewegung, so ist die Peripherie des durchlaufenen Kreises oder die ganze Bahn des Körpers $= ct$, sie ist aber auch $= 2\pi r$, folglich ist $ct = 2\pi r$ und $c = \frac{2\pi r}{t}$, also $p = \frac{m.\frac{4\pi^2.r^2}{t^2}}{r}$ $= \frac{4\pi^2 mr^2}{rt^2} = \frac{4\pi^2 mr}{t^2}$. Bedeuten nun M, P, R und T dasselbe wie m, p, r und t, aber für einen zweiten Kreis, so ist offenbar $P : p = \frac{4\pi^2 MR}{T^2} : \frac{4\pi^2 mr}{t^2} = \frac{MR}{T^2} : \frac{mr}{t^2}$. Nach der Voraussetzung ist aber auch $P : p = \frac{M}{R^2} : \frac{m}{r^2}$ (vergl. §. 378), also ist $\frac{MR}{T^2} : \frac{mr}{t^2} = \frac{M}{R^2} : \frac{m}{r^2}$, und daraus folgt $\frac{MmR}{r^2T^2} = \frac{Mmr}{R^2t^2}$ oder $\frac{R}{r^2T^2} = \frac{r}{R^2t^2}$ oder $R^3t^2 = r^3T^2$, woraus sich $T^2 : t^2 = R^3 : r^3$ ergibt.

§. 484. Wenn sich die Quadrate der Umlaufszeiten wie die Würfel der Entfernungen verhalten, so verhalten sich auch die Centralkräfte grade wie die Massen und umgekehrt wie die Quadrate der Entfernungen.

Es sei $T^2 : t^2 = R^3 : r^3$. Nach dem vorhergehenden §. ist aber $P : p = \frac{MR}{T^2} : \frac{mr}{t^2}$, also ist auch $P : p = \frac{MR}{R^3} : \frac{mr}{r^3} = \frac{M}{R^2} : \frac{m}{r^2}$.

§. 485. An einem in O (Fig. 142) befestigten, unausdehnbaren Faden OA denke man sich in dem Endpunkt A einen materiellen Punkt fest angebracht, eine momentan wirkende Kraft treibe den Punkt A in einer auf OA senkrechten Richtung, so wird derselbe, da die Länge des Fadens unveränderlich ist, und der Punkt wegen des Beharrungsvermögens in jedem Punkte seiner Bahn das Bestreben hat, nach der Tangente fortzugehen, eine Kreislinie beschreiben müssen, deren Mittelpunkt O und deren Radius OA ist. Die Festigkeit des Fadens hindert ihn, sich weiter von O zu entfernen, wirkt

Digitized by Google

also auf den Punkt gerade so, wie eine Centripetalkraft. Das Bestreben des Punktes, sich in der Tangente fortzubewegen, bewirkt aber ein Anspannen des Fadens, welches so groß werden kann, daß der Faden reißt. Die Größe der Kraft, durch welche der Faden gespannt wird, oder mit welcher der Punkt sich von dem Mittelpunkt O zu entfernen strebt, heißt Schwungkraft, auch Centrifugal- oder Fliehkraft.

§. 486. Die Schwungkraft ist der durch die Festigkeit des Fadens erzeugten Centripetalkraft genau gleich und entgegengesetzt.

Denn natürlich wird von der Festigkeit des Fadens nur grade soviel aufgewendet, als die Schwungkraft erfordert. Es gelten also für die Schwungkraft dieselben Ausdrücke, welche wir oben für die Centripetalkraft im Kreise gefunden haben.

Sind demnach P und p 2 verschiedene Schwungkräfte, so haben wir nach §. 482 $P:p=\frac{MC^2}{R}:\frac{mc^2}{r}$. Daraus folgt für M = m 1) $P:p=\frac{C^2}{R}:\frac{c^2}{r}$; für M = m und zu gleicher Zeit C = c 2) P : p = r : R; für M = m und R = r 3) $P:p=C^2:c^2$. Nach §. 483 ist aber auch $P:p=\frac{MR}{T^2}:\frac{mr}{t^2}$, wo T und t die Zeiten bedeuten, in welchen die ganzen Kreisperipherien beschrieben werden. Ist nun hier M = m, so ist 4) $P:p=\frac{R}{T^2}:\frac{r}{t^2}$; ist M = m und T = t, so ist 5) P : p = R : r.

Zur Veranschaulichung der Schwungkraft dient die Centrifugalmaschine, deren Hauptheil eine oder zwei Scheiben sind, die sich um verticale Axen mit beliebiger Geschwindigkeit drehen lassen.

§. 487. Jeder Körper, der sich um eine nicht durch seinen Schwerpunkt gehende und nicht verticale Axe herumdrehen läßt, heißt ein Pendel. Man unterscheidet das einfache oder mathematische Pendel von dem physischen oder zusammengesetzten. Unter ersterem versteht man eine grade Linie, deren einer Endpunkt allein als schwer betrachtet wird, und die sich um ihren anderen Endpunkt drehen läßt. Die Entfernung des Dreh- oder Aufhängepunktes von dem schweren Punkte heißt die Länge des Pendels. Eine kleine Metallkugel an einem feinen Faden, dessen Länge den Durchmesser der Kugel bedeutend übertrifft, kann ohne großen Fehler als einfaches Pendel angesehen werden. Dagegen sind alle in der Wirklichkeit vorkommenden Pendel zusammengesetzte oder physische, da alle ihre Theile von bestimmter Masse sind. Im Folgenden werden der Einfachheit wegen die Gesetze der Pendelbewegung zunächst an dem einfachen Pendel nachgewiesen, und dann erst auf den zusammengesetzten oder physischen Pendel übertragen.

Digitized by Google

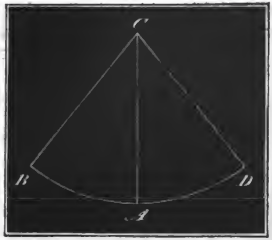


Fig. 143.

§. 488. Ist C (Fig. 143) der Aufhängepunkt, A der einzige schwere Punkt des einfachen Pendels CA, so muß A im Zustande der Ruhe sich genau vertical unter C befinden. Wird nun das Pendel aus der verticalen Lage CA entfernt, und in die Lage CB gebracht, so bildet es mit der verticalen CA einen Winkel ACB $= \alpha$, welcher der Elongationswinkel heißt. Ueberläßt man das Pendel in CB sich selbst, so wird es, von der Schwere angetrieben, durch einen Kreisbogen BA in seine vorige Lage CA zurück, und vermöge der Trägheit selbst über CA hinaus nach CD gehen, von wo es aus gleichen Gründen sich wieder nach der entgegengesetzten Richtung bewegt. Die Bewegung des Pendels von der einen Seite der Verticalen bis zu derselben Höhe auf der anderen Seite nennt man eine einfache Schwingung oder Oscillation des Pendels, die Bewegung von B bis A oder umgekehrt eine halbe Schwingung, die Bewegung von B bis D, und von da zurück bis wieder nach B eine Doppelschwingung. Die Zeit, welche auf eine ganze Schwingung verwendet wird, heißt die Schwingungsdauer oder Schwingungszeit. Schwingungen, welche in gleichen Zeiten vollendet werden, heißen isochrone (ἴσος gleich, χρόνος Zeit) Schwingungen.

§. 489. Eine einfache Oscillation eines Pendels besteht 1) aus einer ungleichförmig beschleunigten und 2) aus einer ungleichförmig verzögerten Bewegung, und zwar nehmen Beschleunigung sowohl, als auch Verzögerung fortwährend ab.

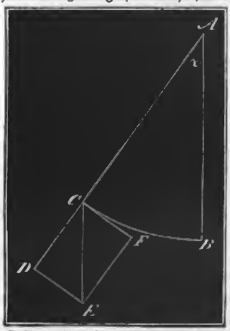


Fig. 144.

Die Bewegung von C nach B (Fig. 144) muß beschleunigt sein, weil sie nur die Folge der Schwerkraft, also einer continuirlichen Kraft, ist. Um nun die Kraft zu finden, welche in jedem Augenblick auf den schweren Punkt wirkt, sei CE die Richtung der Schwerkraft, CE $= g$ ihre Beschleunigung, α der Elongationswinkel CAB, und man zerlege CE in die auf AC senkrechte CF und die mit ihr parallele CD, so wird letztere durch den Widerstand der Linie CA aufgehoben, und zur Bewegung des Punktes bleibt nur CF übrig. CF ist aber $=$ CE $\times$ sin. CEF, und weil $\sphericalangle$ CEF $= \sphericalangle$ ECD $= \sphericalangle$ CAB $= \alpha$ ist, CF $=$ CE $\times$ sin. $\alpha = g$. sin. α. Da der Werth von g sich gleich bleibt, so hängt also der Werth CF von sin. α ab. Dieser wird aber immer kleiner, je mehr sich das Pendel der verticalen Lage AB nähert. Die Bewegung von C bis B ist demnach ungleichförmig beschleunigt, und zwar mit abnehmender Beschleunigung. In AB, wo das Pendel vertical steht, ist α, also auch sin. α, also auch CF $= 0$. Da in B die Schwerkraft nicht mehr bewegend auf dasselbe einwirkt, so muß es sich nun vermöge der Trägheit weiter bewegen, und zwar wegen des Widerstandes der Linie AB in einem Bogen BH, und mit ungleichförmig verzögerter Bewegung, weil die

Digitized by Google

entgegenwirkende Schwere jetzt die Geschwindigkeit wieder in umgekehrter Ordnung so vermindert, wie sie dieselbe bei dem Herabgehen des Pendels durch den Bogen CB vermehrt hat. Aus letzterem Grunde muß auch BH = CB sein.

§. 490. Zur nähern Kenntniß der schwingenden Bewegung eines Pendels ist es nöthig, die Geschwindigkeit bestimmen zu können, welche es in irgend einem Punkte seiner Bahn besitzt. Man findet dieselbe aber durch folgende Betrachtung.

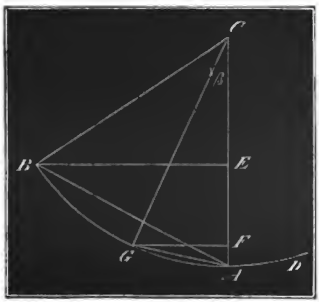


Fig. 103.

Es soll z. B. die Geschwindigkeit bestimmt werden, welche das Pendel besitzt, wenn es in dem Punkte G (Fig. 145) seiner Bahn ankommt. Man ziehe BE und GF senkrecht auf CA, so hat das Pendel in G dieselbe Geschwindigkeit, als wenn es von E bis F frei gefallen wäre (§. 453). Ein Körper, der von E nach F frei fällt, hat aber nach §. 441 die Geschwindigkeit $c = \sqrt{2g \times EF}$. Nun ist EF = CF — CE, und wenn CG = CA = l (Länge des Pendels) und $\sphericalangle ACG = \beta$ gesetzt wird, so ist CF = l × cos. β und CE = l × cos. α, also EF = l.cos. β — l.cos. α = l (cos. β — cos. α), folglich $c = \sqrt{2gl\,(\cos.\beta - \cos.\alpha)}$. Die Geschwindigkeit hängt demnach, da g, l und α constante Größen sind, nur von der Größe des Winkels β ab. Sie wird um so größer, je kleiner β, d. h. je näher das Pendel der Verticalen CA kommt. In A ist β = o, also cos. β = 1, und folglich hat in dieser Lage c seinen größten Werth. Da cos. β = cos. (— β) ist, so ist auch beim Aufsteigen von A nach D die Bewegung genau so verzögert, wie sie bei dem Heruntersteigen beschleunigt ist. Es kann β nicht größer werden, als α, denn sonst wäre cos. β — cos. α negativ, und demnach der Werth für c imaginär; c wird dagegen = o, wenn β = α ist, d. h. also, wenn das Pendel bis zu derselben Höhe aufgestiegen ist, von welcher es auf der anderen Seite gefallen war.

§. 491. Die Geschwindigkeiten zweier Pendel verhalten sich wie die Quadratwurzeln aus den Pendellängen.

Es seien l und l′ die Längen zweier Pendel, c und c′ die Geschwindigkeiten, welche die Pendel erlangen, nachdem sie von gleichen Elongationswinkeln aus ähnliche Bögen zurückgelegt haben, so ist nach dem vorhergehenden Paragraphen $c = \sqrt{2\,g\,l\,(\cos.\beta - \cos.\alpha)}$ und $c' = \sqrt{2\,g\,l'\,(\cos.\beta - \cos.\alpha)}$, also $c : c' = \sqrt{2\,g\,l}(\cos.\beta - \cos.\alpha) : \sqrt{2\,g\,l'}(\cos.\beta - \cos.\alpha)$ oder $c : c' = \sqrt{l} : \sqrt{l'}$.

§. 492. Die in der verticalen Lage erlangte Geschwindigkeit eines Pendels hängt ab von der Größe des Elongationswinkels, so daß die in dieser Lage erlangten Geschwindigkeiten sich verhalten wie die Quadratwurzeln der senkrechten Höhen, durch welche das Pendel gefallen ist.

Digitized by Google

Ist c die Geschwindigkeit, welche ein Pendel erlangt, nachdem es von B bis A (Fig. 145) gefallen ist, und c′ diejenige Geschwindigkeit, welche dasselbe Pendel erlangt, wenn es von G bis A gefallen ist, so ist nach §. 453 $c = \sqrt{2g \times EA}$ und $c' = \sqrt{2g \times FA}$, also $c : c' = \sqrt{2g \times EA} : \sqrt{2g \times FA} = \sqrt{EA} : \sqrt{FA}$.

Dieselben Geschwindigkeiten verhalten sich aber auch wie die Sehnen der von dem Pendel durchlaufenen Bögen. Denn zieht man (Fig. 145) die Sehnen BA und GA, und bezeichnen wir den Durchmesser des Kreises mit d, so ist nach einem planimetrischen Satze $EA : AB = AB : d$ und ebenso $AF : AG = AG : d$, also $EA = \frac{AB^2}{d}$ und $AF = \frac{AG^2}{d}$, folglich

$$c : c' = \sqrt{\frac{AB^2}{d}} : \sqrt{\frac{AG^2}{d}} = \sqrt{AB^2} : \sqrt{AG^2} = AB : AG.$$

§. 493. Bei zwei Pendeln von ungleicher Länge verhalten sich die Schwingungszeiten wie die Quadratwurzeln aus den Pendellängen.

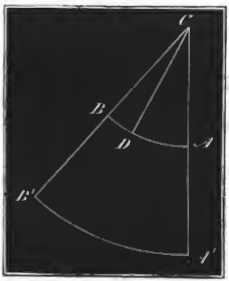


Fig. 146.

Es seien CA und CA′ (Fig. 146) die Pendellängen gleich l und l′, $\sphericalangle BCA = \alpha$ der Elongationswinkel, t und t′ die Schwingungszeiten für die halben Schwingungsbögen BA und B′A′. Nach §. 489 ist die Beschleunigung, mit welcher sowohl BA, als auch B′A′ zurückgelegt wird, $= g . \sin.\alpha$, folglich der zurückgelegte Weg $BA = \frac{1}{2} g t^2 \times \sin.\alpha$, und der zurückgelegte Weg $B'A' = \frac{1}{2} g t'^2 \times \sin.\alpha$. Es ist also $t^2 = \frac{BA}{\frac{1}{2} g . \sin.\alpha}$, $t = \sqrt{\frac{BA}{\frac{1}{2} g \times \sin.\alpha}}$, und ebenso $t'^2 = \frac{B'A'}{\frac{1}{2} g . \sin.\alpha}$, $t' = \sqrt{\frac{B'A'}{\frac{1}{2} g . \sin.\alpha}}$, also $t : t' = \sqrt{\frac{BA}{\frac{1}{2} g . \sin.\alpha}} : \sqrt{\frac{B'A'}{\frac{1}{2} g . \sin.\alpha}} = \sqrt{BA} : \sqrt{B'A'}$. Die ähnlichen Bögen BA und B′A′ verhalten sich aber wie ihre Radien CA und CA′ oder wie l und l′, folglich ist auch $t : t' = \sqrt{l} : \sqrt{l'}$.

§. 494. Die Schwingungszeiten für Pendel von gleicher Länge verhalten sich umgekehrt wie die Quadratwurzeln aus den Schwerkräften.

Der Elongationswinkel beider Pendel sei $= \alpha$, dann sind auch die von denselben zurückgelegten Schwingungsbögen einander gleich. Wirkt nun die auf das eine Pendel einwirkende Schwerkraft beim freien Falle die Beschleunigung g, und die auf das andere Pendel einwirkende Schwerkraft die Beschleunigung g′, so bewegt sich das eine Pendel mit der Beschleunigung $g \times \sin.\alpha$ und das andere mit $g' \times \sin.\alpha$. Der Schwin-

Digitized by Google

gungsbogen des einen läßt sich nun ausdrücken durch $\frac{1}{2} g t^2 . \sin.\alpha$, und der des anderen durch $\frac{1}{2} g' t'^2 \sin.\alpha$, und da beide einander gleich sind, so ist $\frac{1}{2} g t^2 . \sin.\alpha = \frac{1}{2} g' t'^2 . \sin.\alpha$, also $g t^2 = g' t'^2$, oder es ist $t^2 : t'^2 = g' : g$ und $t : t' = \sqrt{g'} : \sqrt{g}$.

§. 495. Bei gleichen Elongationswinkeln und gleichen Schwingungszeiten verhalten sich die Schwerkräfte wie die Pendellängen.

Da jetzt die Pendellängen nicht gleich sind, so sind auch die halben Schwingungsbögen nicht mehr einander gleich, aber weil der Elongationswinkel derselbe ist, so sind es jedenfalls ähnliche Bögen, sie verhalten sich also wie ihre Halbmesser, d. h. wie die Pendellängen. In den in dem vorigen Paragraphen gefundenen Ausdrücken für die halben Schwingungsbögen ist aber jetzt $t = t'$, folglich ist $\frac{1}{2} g t^2 . \sin.\alpha : \frac{1}{2} g' t'^2 . \sin.\alpha = l : l'$, oder $g : g' = l : l'$.

§. 496. Pendel von gleicher Länge, welche durch ungleich große Bögen schwingen, vollenden ihre Schwingungen in gleichen Zeiten, vorausgesetzt, daß diese Bögen so klein sind, daß ihr Verhältniß zu einander dem Verhältnisse ihrer Sinusse gleichgesetzt werden darf; die Schwingungen sind also isochron.

Es seien CB und CD (Fig. 146) zwei Pendel von gleicher Länge, α und β ihre Elongationswinkel BCA und DCA, die von ihnen zurückgelegten Wege BA und DA seien s und s'. Nun sind die beschleunigenden Kräfte in B und D $= g \times \sin.\alpha$ und $g \times \sin.\beta$, also $s = \frac{1}{2} g t^2 \times \sin.\alpha$ und $s' = \frac{1}{2} g t'^2 \times \sin.\beta$, also $t^2 = \frac{s}{\frac{1}{2} g \times \sin.\alpha}$ und $t'^2 = \frac{s'}{\frac{1}{2} g \times \sin.\beta}$,

also $t^2 : t'^2 = \frac{s}{\frac{1}{2} g \times \sin.\alpha} : \frac{s'}{\frac{1}{2} g \times \sin.\beta} = \frac{s}{\sin.\alpha} : \frac{s'}{\sin.\beta}$, und $t : t' = \sqrt{\frac{s}{\sin.\alpha}} : \sqrt{\frac{s'}{\sin.\beta}}$. Sind nun die Bögen BA und DA so klein, daß sie ihren Sinussen proportional gesetzt werden können, dann ist $s : s' = \sin.\alpha : \sin.\beta$, also $\frac{s}{\sin.\alpha} = \frac{s'}{\sin.\beta}$ und $\sqrt{\frac{s}{\sin.\alpha}} = \sqrt{\frac{s'}{\sin.\beta}}$, mithin auch $t = t'$.

§. 497. Die Quadrate der Schwingungszahlen verhalten sich umgekehrt wie die Pendellängen.

Die Schwingungszahlen seien n und n', die Pendellängen l und l' und die Schwingungszeiten t und t'. Nun liegt es in der Natur der Sache, daß die Anzahl der Schwingungen, welche zwei Pendel in derselben Zeit vollenden, d. h. ihre Schwingungszahlen, sich umgekehrt verhalten wie die Schwingungszeiten, also ist $n : n' = t' : t$. Nach §. 493 ist aber auch $t' : t = \sqrt{l'} : \sqrt{l}$, folglich ist $n : n' = \sqrt{l'} : \sqrt{l}$ oder $n^2 : n'^2 = l' : l$.

§. 498. Es soll die Dauer einer Pendelschwingung für einen sehr kleinen Elongationswinkel gefunden werden.

Digitized by Google

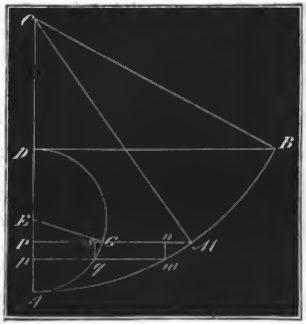


Fig. 147

Es sei CA (Fig. 147) $= l$ die Länge des Pendels, $\sphericalangle$ ACB $= \alpha$ der sehr kleine Elongationswinkel, und von B aus sei der schwere Punkt des Pendels durch den Kreisbogen BM bis M gelangt, so ist nach §. 543 und §. 441 seine Geschwindigkeit v, die er in M hat, $= \sqrt{2g \times DP}$. Gesetzt nun, der schwere Punkt des Pendels lege mit dieser Geschwindigkeit noch einen unendlich kleinen Bogen Mm zurück, so kann man die Geschwindigkeit während der darauf verwandten Zeit τ als constant ansehen, dann ist Mm $= v\tau = \tau \cdot \sqrt{2g \times DP}$ und $\tau = \frac{Mm}{\sqrt{2g \times DP}}$. Man ziehe nun mp $\parallel$ MP und mn $\perp$ MP, so ist $\triangle$ Mmn $\sim$ $\triangle$ CMP, denn $\sphericalangle$ n $=$ $\sphericalangle$ P $=$ 1 R., und da Mm ein unendlich kleiner Bogen ist, so kann man die Sehne Mm als mit dem Bogen Mm oder mit der Tangente an dem Punkte M zusammenfallend ansehen; dann steht Mm $\perp$ CM, also $\sphericalangle$ mMn $=$ $\sphericalangle$ MCP. Daher ist Mm : mn $=$ CM : MP, und, weil mn $=$ Pp ist, Mm : Pp $= l$: MP, und Mm $= l \cdot \frac{Pp}{MP}$. Es ist ferner $MP^2 = AP\ (2l - AP)$. Da aber schon der Winkel ABC sehr klein angenommen ist, also um so mehr $\sphericalangle$ MCA sehr klein ist, so muß nothwendig AP so klein sein, daß es gegen 2 l vernachlässigt werden kann; dann ist $MP^2 = 2l \times AP$ und $MP = \sqrt{2l \times AP}$. Setzen wir diesen Werth in den oben gefundenen Werth für Mm ein, so ist Mm $= l \cdot \frac{Pp}{\sqrt{2l \times AP}}$, und wenn man diesen Werth von Mm in den oben gefundenen Werth von τ setzt, dann ist $\tau = \frac{1 \times Pp}{\sqrt{2l \times AP \times 2g \times DP}}$

$= \frac{l}{\sqrt{4lg}} \times \frac{Pp}{\sqrt{AP \times DP}} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{l^2}{lg}} \times \frac{Pp}{\sqrt{AD \times DP}} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{l}{g}} \times \frac{Pp}{\sqrt{AP \times DP}}$. Ueber AD als Halbmesser beschreibe man den Halbkreis AGD, E sei sein Mittelpunkt, G und q die Durchschnittspunkte mit MP und mp, dann ist $GP = \sqrt{AP \times DP}$, also $\tau = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{g}} \times \frac{Pp}{GP}$.

Zieht man nun noch GE, und dann qs $\perp$ MP so ist $\triangle$ EPG $\sim$ $\triangle$ Gsq, denn $\sphericalangle$ s $=$ $\sphericalangle$ P $=$ 1 R und Gq kann als Tangente an dem Punkte G angesehen werden, so daß $\sphericalangle$ sGq $=$ $\sphericalangle$ PEG ist. Es ist also qs : Gq $=$ GP : EG, und weil qs $=$ Pp und EG $=$ EA ist, Pp : Gq $=$ GP : EA, folglich $\frac{Pp}{GP} = \frac{Gq}{EA}$ und $\tau = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{g}} \times \frac{Gq}{EA}$. Da nun τ die Zeit bezeich-

Digitized by Google

net, während welcher der Punkt B sich durch den unendlich kleinen Bogen Mm bewegt, so denke man sich, um die Zeit der Bewegung durch den Bogen BA zu finden, BA in unendlich viele, ebenfalls unendlich kleine Theile getheilt. Für die auf jeden derselben verwandte Zeit findet man einen ähnlichen Ausdruck, wie für τ, nämlich $\frac{1}{2}\sqrt{\frac{l}{g}}$ multiplicirt mit einem Quotienten, dessen Dividend derjenige Bogen des Halbkreises AGD ist, welcher zwischen den von den Endpunkten des durchlaufenen Bogens auf AC gefällten Senkrechten eingeschlossen ist, während der Divisor allemal der Halbmesser EA ist. Die auf die Bewegung durch den Bogen BA verwandte Zeit ist daher $= \frac{1}{2}\sqrt{\frac{l}{g}}$ multiplicirt mit dem Quotienten, dessen Dividend der Halbkreis DGA und dessen Divisor der Radius EA ist, also ist, wenn t die Schwingungsdauer bezeichnet, $\frac{t}{2} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{l}{g}} \times \frac{\text{Halbkreis DGA}}{\text{EA}} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{l}{g}} \times \frac{\pi \times \text{EA}}{\text{EA}} = \frac{1}{2}\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ und $t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.

Für einen größeren Elongationswinkel muß man, wie die höhere Analysis lehrt, $t = \pi\sqrt{(1 \times \frac{\alpha}{16})\frac{l}{g}}$ setzen.

§. 499. Die Gesetze der Pendelschwingungen wurden zuerst von Galilei aufgefunden. Schon in seinem 18ten Jahre machte ihn das Schwingen einer Lampe in dem Dome zu Pisa darauf aufmerksam.

Um die Gesetze des einfachen Pendels auch auf den physischen Pendel anwenden zu können, ist nur nöthig, die Pendellänge desselben zu bestimmen. Es geschieht dies am einfachsten dadurch, daß man mit dem physischen Pendel gleichzeitig ein kleines Bleikügelchen an einem feinen Faden (eine Vorrichtung, die dem einfachen Pendel nahe kommt) schwingen läßt, und den Faden so lange verkürzt oder verlängert, bis die Schwingungen des Bleikügelchens mit den Schwingungen des Pendels isochron sind. Die Länge des physischen Pendels muß dann der Länge dieses gewissermaßen einfachen Pendels gleichgesetzt werden. Der Punkt des physischen Pendels, der von seinem Aufhängepunkte dieselbe Entfernung hat, wie das Bleikügelchen von dem Ende des Fadens, heißt sein Schwingungspunkt oder Mittelpunkt der Schwingungen. Die Versuche ergeben, daß, wenn der Pendel eine gleichförmige Stange ist, die um ihr eines Ende schwingt, der Schwingungspunkt um ein Drittel der Länge der ganzen Stange von dem anderen Ende abliegt. Daraus geht aber hervor, daß der Schwingungspunkt nicht mit dem Schwerpunkt (der ja in diesem Falle in der Mitte der Stange liegen muß) zusammenfällt.

Wenn man an einem Pendel nach den beiden Enden zu zwei Schneiden so anbringt, daß das Pendel stets gleich schnell schwingt, wenn es in der einen, oder wenn es in der anderen Schneide unterstützt wird, so nennt man ein solches Pendel ein Reversionspendel. Um einem solchen Pendel die angegebene Eigenschaft zu ertheilen, werden an der Pendelstange ver-

Digitized by Google

schiebbare Laufgewichte angebracht, welche so lange hin und her bewegt, und dadurch die Schwingungs-Mittelpunkte verändert werden, bis sie genau mit den Schneiden zusammenfallen. Die Entfernung der beiden Schneiden von einander ist dann natürlich der Länge eines gleich schnell schwingenden mathematischen Pendels gleich.

Ein Pendel würde ein wahres perpetuum mobile sein, wenn es keine Hindernisse der Bewegung gäbe, aber die Reibung der Axe in der Pfanne und der Widerstand des Mittels vermindern seine Bewegung nach und nach immer mehr, bis es endlich zur Ruhe kommt. Doch kann man durch Anwendung scharfschneidiger Axen, ein bedeutendes Gewicht des Pendelkörpers, und insbesondere durch eine passende, am besten linsenförmige Gestalt desselben die Oscillationen ohne weitere Beihülfe einer Kraft mehrere Stunden lang andauernd erhalten.

Die Gleichzeitigkeit aller Schwingungen eines Pendels, welches immer dieselbe Länge behält, empfiehlt es zum bequemen und richtigen Zeitmesser. Zu dem Ende verbindet man es in den Pendeluhren mit einem Räderwerk. Das Räderwerk wird durch ein Gewicht in Bewegung gesetzt, welches an einer Schnur oder Kette, die um die Welle eines der Räder gewickelt ist, herabhängt. Durch die Bewegung des Räderwerks allein kann kein Zeitmaß erzielt werden, indem das Gewicht, wenn auch langsam, doch stets mit beschleunigter Bewegung niedergeht. Soll daher ein gleichmäßiger Gang des Werkes erzielt werden, so muß noch ein Regulator der Bewegung hinzukommen. Dazu dient nun das Pendel mit seinen gleichdauernden Schwingungen. Durch das Pendel wird nämlich der mit ihm verbundene Sperrhaken oder Anker ebenfalls in Schwingungen versetzt, der bald mit seinem einen, bald mit seinem anderen Arme in die Zähne des Steigrades eingreift, und dadurch die Drehung des Rades eine kurze Zeit hemmt. Der Sperrhaken bekommt dadurch zu gleicher Zeit durch die Bewegung des Rades stets einen neuen Stoß, wodurch natürlich bewirkt wird, daß das mit ihm verbundene Pendel nicht seine Bewegung ganz verlieren, und zur Ruhe kommen kann. In den Taschenuhren wird das das Räderwerk bewegende Gewicht durch eine zusammengewundene Spiralfeder, und das Pendel durch eine Spiralfeder in Verbindung mit einem Schwungrade (Unruhe) vertreten. Das Schwungrad spannt nämlich mit seiner durch die Bewegung erlangten Geschwindigkeit die Spiralfeder, welche vermöge ihrer Elasticität das Rad dann nach der entgegengesetzten Seite wirft, wodurch sie selbst auf's Neue gespannt wird, und solchergestalt regelmäßige Schwingungen hervorbringt, die auf ein Hemmwerk übergetragen werden. Die Pendeluhren sind eine Erfindung von Huyghens (1658), dem wir auch überhaupt die Kenntniß einiger der wichtigsten Pendelgesetze verdanken. Früher bediente man sich der Sand- und Wasseruhren. Da die Schwingungsdauer eines Pendels nur so lange dieselbe ist, als seine Länge unverändert bleibt, die Wärme aber die Pendel ebenso gut wie alle übrigen Körper ausdehnt, so folgt daraus, daß auch die Pendeluhren keinen ganz gleichförmigen Gang haben können, sondern in höherer Temperatur langsamer gehen, als bei niedrigerer Temperatur. Für Beobachtungen, bei welchen es auf eine große Genauigkeit der Zeitbestimmung ankommt, wie z. B. in der Astronomie, mußte demnach auf Abstellung dieses Uebelstandes gedacht werden. So ent-

Digitized by Google

ſtanden die Compenſationspendel, von welchen bereits in §. 304 die Rede war.

Wenn ein Pendel nicht in dem einen Endpunkt aufgehängt iſt, ſondern in einem zwiſchen beiden liegenden Punkte, und man dann einen ſchweren Körper oberhalb des Aufhängepunktes an der Pendelſtange anbringt, ſo kann die Linſe nicht abwärts ſchwingen, ohne den ſchweren Körper zu heben, wodurch die Beſchleunigung der Linſe gemindert, alſo auch die Schwingungsdauer des Pendels verlängert wird. Hierauf gründet ſich die Einrichtung des Metronomen oder Taktmeſſers, welcher angewandt wird, um einen Takt für die Muſik genau und ſichtbar anzugeben.

§. 500. Noch wichtiger wird dem Phyſiker das Pendel dadurch, daß es die Geſetze der irdiſchen Schwere unmittelbar darthut. Es zeigt nämlich 1) die Richtung eines ruhigen Pendels die Richtung der Schwere an; 2) die Gleichzeitigkeit kleiner Schwingungen bei Pendeln von gleicher Länge thut die ſtets unveränderliche Wirkſamkeit der Schwere an einem und demſelben Orte der Erde dar; 3) der Umſtand, daß Pendel von dem mannichfaltigſten Material, wenn ſie nur gleich geſtaltet ſind, gleichzeitig ſchwingen, beweiſet, daß alle Materie gleich ſchwer iſt. Newton hat ſolche Verſuche gemacht mit Gold, Silber, Blei, Glas, Sand, Kochſalz, Waſſer, Waizen, Holz; Beſſel mit Gold, Silber, Blei, Eiſen, Zink, Meſſing, Marmor, Thon, Quarz, Waſſer, Meteoreiſen und Meteorſtein. 4) Setzt man in §. 498 $t = 1$, dann iſt $1 = \frac{g}{\pi^2}$. Iſt nun g bekannt, ſo findet man hieraus die Länge des Secundenpendels. Allein da es in der Wirklichkeit ganz unmöglich iſt, den Werth von g durch Fallverſuche genau zu ermitteln, ſo beſtimmt man umgekehrt den Werth von g, d. h. die Beſchleunigung bei dem freien Fall, aus der durch Verſuche gefundenen Länge des Secundenpendels. Man erhält $g = 4{,}93479 \ldots \times l$. Den Werth von l aber findet man dadurch, daß man ein Pendel von beliebiger, aber genau gemeſſener Länge L eine längere und genau beobachtete Zeit hindurch ſchwingen läßt, die während dieſer Zeit vollbrachten Schwingungen zählt, und dann §. 497 anwendet. 5) Da ein Pendel auf dem Gipfel eines Berges weniger Schwingungen macht, als am Fuße deſſelben, ſo nimmt die Schwere ab, wenn man ſich von dem Erdmittelpunkt entfernt. 6) Durch Pendelbeobachtungen hat man das ſchon von Newton aufgeſtellte Geſetz bewährt gefunden, daß die Schwere gegen den Aequator zu abnimmt, gegen die Pole aber wächſt. 7) Sogar die Gegenſeitigkeit der Anziehung unter allen Körpern der Erde wird aus den Erſcheinungen ſichtbar, welche uns Pendel darbieten. Man bemerkt nämlich, daß ein Pendel in der Nähe großer Berge gegen dieſelben abgelenkt wird.

E. Von den Hinderniſſen der Bewegung.

§. 501. In den bisherigen Unterſuchungen über die Bewegung der Körper wurde der Einfachheit wegen keine Rückſicht genommen auf die Hinderniſſe, welche ihrer Bewegung im Wege ſtehen. Der Erfahrung gemäß ſind dieſe aber ſehr beträchtlich, und haben theils ihren Grund in der Ungleichheit der Oberflächen, theils in dem Widerſtande des Mittels, in welchem die Körper ſich bewegen, theils auch wird durch Biegſamkeit, Elaſti-

Digitized by Google

cität, Adhäsion der Körper und dergleichen noch manches andere Hinderniß begründet.

§. 502. Wäre eine Last auf einer horizontalen Ebene fortzubewegen, so müßte, da die Schwere der Last von der horizontalen Ebene ganz getragen wird, die kleinste Kraft eine Bewegung der Last hervorbringen, und einmal angestoßen müßte sich die Last mit gleichförmiger Geschwindigkeit auf der horizontalen Ebene fortbewegen. Der Erfahrung gemäß ist aber oft ein bedeutender Kraftaufwand nöthig. Die Körper sind nämlich nie so glatt, daß, wenn einer auf dem anderen sich befindet, sie von einander scharf gesondert bleiben, sondern es dringen die Erhöhungen des einen in die Vertiefungen des anderen ein, und sie haften dann fest an einander. Soll nun eine Bewegung des einen über den anderen eintreten, so müssen die Erhöhungen losgerissen oder verschoben werden, oder der Körper muß sich heben, um die Erhöhungen seiner Unterlage zu übersteigen. Dieses Hinderniß der Bewegung ist es, welches man mit dem Namen der Reibung oder Friction bezeichnet. Um die Reibung zu überwinden, muß man eine Kraft anwenden, welche einem aliquoten Theil der Last gleich ist. Die Zahl, welche das Verhältniß dieser Kraft zur Last angibt, heißt Reibungscoëfficient. Er hängt natürlich von der Eigenthümlichkeit der reibenden Flächen ab, und kann nur durch den Versuch bestimmt werden. Zu solchen Versuchen bedient man sich eines Apparates, dem man den Namen Tribometer oder Reibungsmesser beigelegt hat. Er besteht aus einem Tische mit vollkommen horizontaler Platte, an deren Rande eine Rolle angebracht ist. Die Körper, deren Reibung gefunden werden soll, werden auf den Tisch gelegt, und der eine mittelst eines Fadens, der über die Rolle geht, und an seinem Ende eine Wagschale mit Gewichten trägt, über dem anderen fortgezogen. Man muß nun genau bestimmen, bei welchem Gewichte die Bewegung grade anfängt. Man kann sich auch einer schiefen Ebene, welcher verschiedene Steigungswinkel gegeben werden können, bedienen, um die Kraft zu messen, welche erfordert wird, den Reibungswiderstand für die gleitende Bewegung zu überwinden. Man vergrößert nämlich den Neigungswinkel so lange, bis man den größten Winkel gefunden hat, unter welchem die Ebene geneigt werden kann, ohne daß der Körper hinabgleitet. Diesen Winkel mißt man, und nun weiß man, daß sich das Fallbestreben auf der schiefen Ebene zu dem Drucke gegen dieselbe verhält, wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Grundlinie, wodurch man also im Stande ist, die Kraft zu bestimmen, die erfordert wird, um die Reibung zu überwinden.

§. 503. Die Resultate der angestellten Versuche sind folgende: 1) die Größe der Reibung ist bei übrigens gleichen Umständen dem Drucke proportional, der Körper mag ruhen, oder sich mit was immer für einer Geschwindigkeit bewegen; nur bei faserigen Körpern nimmt die Reibung ab, wenn der Druck wächst. 2) Die Reibung wächst mit der Zeit der Berührung, doch so, daß sie nach einer gewissen Zeit den größten Werth erlangt. Dies geschieht bei Metall auf Metall fast augenblicklich, bei Holz auf Holz nach einigen Minuten, bei Holz auf Metall erst nach Tagen. 3) Die Reibung ist desto größer, je rauher die sich berührenden Flächen sind, doch kann sie auch eine zu strenge Politur vermehren; bei mäßiger Glätte ist der Reibungscoëfficient $= \frac{1}{3}$. 4) Bei harten Körpern ist die Reibung von der Größe der Berührungsfläche unabhängig, bei weichen und faserigen

Digitized by Google

wächst sie mit der Berührungsfläche. 5) Beim Uebergange aus der Ruhe in die Bewegung beträgt die Reibung mehr, als während der Bewegung. 6) Die Geschwindigkeit hat, wenn sie nicht sehr groß ist, keinen bedeutenden Einfluß auf die Reibung, sobald sich Holzarten oder Metalle ohne Schmiere auf einander reiben; bei Körpern verschiedener Art, z. B. bei Holz auf Metall, wächst die Reibung beinahe in einer geometrischen Progression, wenn die Geschwindigkeiten in einer arithmetischen zunehmen. 7) Gleichartige Körper reiben sich gewöhnlich stärker, als ungleichartige, aber auch unter ungleichartigen findet ein bedeutender Unterschied statt. So reibt sich z. B. Stahl am wenigsten auf Zink, mehr auf Messing, noch mehr auf Blei oder Kupfer, am meisten auf Zinn. 8) Cylindrische und runde Körper reiben sich weniger, als ebene, und würden es noch weniger thun, wenn sie nicht platt gedrückt würden. 9) Holz reibt sich auf Holz minder, wenn sich die Fasern durchkreuzen, als wenn sie parallel laufen. 10) Feuchtigkeit vermehrt die Reibung der Hölzer, Hitze diejenige der Metalle. 11) Schmiermittel vermindern die Reibung, wenn sie zweckmäßig angewendet und oft genug erneuert werden.

Aus diesen Gesetzen ergeben sich auch die Mittel, welche uns zu Gebote stehen, um die Reibung zu vermindern. Diese sind: Glätten der Oberflächen; Verminderung des Gewichts des zu bewegenden Körpers, so viel es andere Rücksichten zulassen; Vermeidung der Gleichartigkeit der Körper, welche sich reiben; Umänderung der gleitenden Bewegung in eine rollende; und zweckmäßige Anwendung der Schmiermittel. Walzen, Frictionsrollen.

§. 504. Ein zweites Hinderniß der Bewegung ist der **Widerstand des Mittels**. Das Mittel, in welchem die Körper sich bewegen, muß nämlich selbst eine Bewegung erhalten, und den Körpern darum von der ihrigen rauben. Offenbar hängt dieser Widerstand von der Größe, Gestalt und Geschwindigkeit des bewegten Körpers, sowie von der Dichte und dem Grade der Flüssigkeit des Mittels ab, allein die Formeln, durch welche man das Gesetz dieser Abhängigkeit ausgedrückt hat, stimmen mit der Erfahrung nicht genügend überein. So zeigt die Theorie, daß bei übrigens gleichen Umständen der Widerstand des Mittels dem Quadrate der Geschwindigkeit des bewegten Körpers proportional sei. Denn stellt man sich vor, die widerstehende Flüssigkeit bewege sich gegen den Körper, während dieser in Ruhe ist, und es komme in einer Secunde die Masse M mit der Geschwindigkeit c zum Stoße, so ist der Stoß selbst $= Mc$. Jene Masse M ist aber um so größer, je größer die Geschwindigkeit ist. Bezeichnet man die Größe des widerstehenden Querschnitts im Körper mit q, so ist die Flüssigkeitsmenge M, welche in einer Secunde durch diesen Querschnitt geht, $= qc$. Führt man nun diesen Werth von M in die obige Größe des Stoßes ein, so erhält man dafür qc^2. Die Erfahrung stimmt aber mit diesem Gesetze nur bei mittleren Geschwindigkeiten überein, bei größeren und sehr kleinen weicht sie sehr davon ab.

§. 505. Oben wurde auch noch bemerkt, daß durch Biegsamkeit, Elasticität, Adhäsion der Körper und dergleichen noch manches Hinderniß begründet werde. So z. B. wird ein schwerer kugelförmiger Körper in Folge seiner Elasticität flach gedrückt, und verhält sich bei dem Fortrollen einem Polyeder ähnlich. Elastische, biegsame oder weiche Unterlagen erhalten dieser ihrer Beschaffenheit gemäß Vertiefungen, welche dem Fortschieben der Körper

Digitized by Google

auf ihnen im Wege stehen. Stricke widerstehen vermöge ihrer Steifheit, wenn sie grade sind, der Biegung, wenn sie gebogen sind, der Annahme einer graden Form. In Beziehung auf Stricke, welche sich um Rollen oder Walzen bewegen sollen, sind von Coulomb und Anderen folgende Gesetze gefunden worden: 1) der Biegungswiderstand wächst proportional mit den spannenden Gewichten; 2) er wird größer, je dicker und steifer der Strick ist; 3) er steht im umgekehrten Verhältniß zu dem Halbmesser der Rolle oder der Walze.

Drittes Kapitel.

Hydrostatik.

§. 506. Flüssige Körper sind, wie schon früher bemerkt wurde (§. 13), solche, deren Theilchen sich mit der größten Leichtigkeit verschieben lassen, so daß man sie bei theoretischen Untersuchungen als absolut leicht, d. h. durch die kleinste denkbare Kraft schon, verschiebbar annimmt. Die wirklichen Körper entfernen sich aber von diesem idealen Zustande mehr oder weniger. Unter den flüssigen Körpern nennt man diejenigen tropfbar flüssig, welche in kleinen Massen in Kugelgestalt als Tropfen erscheinen, aber in größeren Massen die Form der Gefäße annehmen, in welchen sie sich befinden, welche also zwar keine selbstständige Gestalt, wohl aber noch ein selbstständiges Volumen haben. Es liegt in der Natur der Sache, daß jene Gleichheit des Zugs und Gegenzugs, wie sie zur Erzeugung einer absolut leichten Verschiebbarkeit der Theilchen nothwendig ist, nur im Innern einer Masse stattfinden könne, an der Oberfläche derselben aber nicht möglich ist. Darum sind tropfbare Flüssigkeiten nur im Innern so leicht verschiebbar, an der Oberfläche aber gleichsam mit einem festen Häutchen überzogen, wie sich schon daraus ersehen läßt, daß auf einer Flüssigkeit ein specifisch schwererer Körper schwimmen kann (stählerne Nähnadeln auf Wasser), und sie wie ein leicht gespanntes Häutchen eindrückt, so lange er nicht benetzt ist, während er rasch zu Boden fällt, wenn er naß geworden, und somit nur die feste Haut durchbrochen hat.

§. 507. Das Verhältniß der Molecular-Anziehung und Abstoßung ist bei tropfbaren Flüssigkeiten von der Art, daß meistens an der Oberfläche die abstoßende Kraft das Uebergewicht hat. Dieses geht daraus hervor, daß eine tropfbare Masse oft an der Oberfläche schnell in den ausdehnsamen Zustand übergeht, wenn sich nicht ein Widerstand diesem Bestreben entgegensetzt. Im Innern der Masse steht der Druck der oberen Theile verbunden mit dem auf denselben ruhenden Atmosphärendruck diesem Bestreben entgegen; auch wirken die Theilchen nicht auf die ganze Umgebung abstoßend, sondern nur auf die zunächst gelegenen Theilchen, auf die ferneren äußern sie anziehende Wirkung. Dieses deutet darauf hin, daß die zwei Kräfte, die anziehende und die abstoßende, nach verschiedenen Gesetzen in die Entfernung wirken, und daß die Abstoßung rascher abnimmt, als die Anziehung.

Digitized by Google

Fig. 148.

Um sich von dem Spiele der Kräfte in einem tropfbaren Körper eine klare Vorstellung zu machen, denke man sich, es sei a (Fig. 148) ein Theilchen, auf welches alle anderen wirken, welche innerhalb des um dasselbe als Centrum beschriebenen Kreises liegen, so daß der Halbmesser dieses Kreises zugleich jener der Wirkungssphäre der anziehenden und abstoßenden Kräfte der Theilchen ist, welche auf a wirken können. Man denke sich die Kräfte zuerst bloß als anziehend. So lange sich innerhalb der ganzen Sphäre Theilchen von einerlei Natur und Dichte befinden, wird a nach allen Richtungen gleich stark angezogen, und die Wirkungen aller Theile auf dieses Theilchen heben sich gegenseitig auf. Ist aber a der Flüssigkeitsoberfläche mn näher, als der Halbmesser der Wirkungssphäre beträgt, so ziehe man von der Umgrenzung der Ebene, in welcher jene Sphäre von mn geschnitten wird, ba und ca nach dem Centrum a, und verlängere sie bis zu der entgegengesetzten Grenze der Sphäre, nämlich bis d und e. Da ist es nun klar, daß die Wirkungen aller innerhalb bac gelegenen Theile auf a durch die Wirkungen jener Theile, welche sich innerhalb dae befinden, aufgehoben werden, die außerhalb de im Abschnitte dfe gelegenen Theile aber üben eine Wirkung aus, welche durch die über bc im Abschnitt bgc befindlichen nicht mehr aufgehoben werden kann, da sich über bc entweder ein leerer Raum, oder doch ein Körper von anderer Natur befindet. Wird leerer Raum angenommen, so erfährt das Theilchen a eine Anziehung von den innerhalb dfe gelegenen Theilchen, und die Wirkung dieser ist zugleich die resultirende Wirkung aller Theile innerhalb der Wirkungssphäre. Liegt gf symmetrisch zwischen be und ed, so bezeichnet diese grade Linie zugleich die Richtung der resultirenden Kraft, und die Anziehung erfolgt nach dieser Richtung. Handelt es sich nicht um anziehende, sondern um abstoßende Kräfte, so bleibt Alles wie zuvor, nur wird das Theilchen a von den innerhalb dfe befindlichen Theilchen abgestoßen, und es erfolgt die Abstoßung in der Richtung fa. Je näher a der Oberfläche liegt, desto größer ist die resultirende Anziehung oder Abstoßung auf a, weil dfe desto mehr wirksame Theile enthält, und diese sich zugleich desto näher an a befinden.

Fig. 149.

Stellt der kleine Kreis (Fig. 149) den Durchschnitt der Abstoßungs-, der größere jenen der Anziehungssphäre vor, so sieht man, daß alle innerhalb des ersteren Kreises liegenden Theilchen abstoßend, alle innerhalb des Zwischenraumes liegenden anziehend, auf a wirken. Ist nun a der Flüssigkeitsoberfläche mn näher, als der Halbmesser der Anziehungssphäre ist, so erscheint die resultirende Wirkung aller Theile auf a anziehend. Ist aber m'n' die Oberfläche der Flüssigkeit, und also a näher an derselben, als selbst der Halbmesser der Abstoßungssphäre ist, so ist die

Digitized by Google

Gesammtwirkung der Theile auf a aus Abstoßung und Anziehung zusammengesetzt. Ist dann die resultirende Anziehung kleiner, als die resultirende Abstoßung, so erscheint die Totalwirkung abstoßend. Letzteres ist in der Regel bei den oberflächlich liegenden Theilchen der Fall.

§. 508. Aus diesen Betrachtungen geht hervor, daß jede unendlich dünne Schichte im Innern eines tropfbaren Körpers durch eine Kraft zusammengedrückt werde, welche aus der Gesammtwirkung der Abstoßung der unmittelbar angrenzenden, und aus der Anziehung der etwas entfernteren entspringen muß, und man sich die Sache so vorstellen könne, als wenn sich die genannte Schicht an der einerseits befindlichen Flüssigkeit anstemmte, und von der anderseits gelegenen comprimirt würde. Die Größe der Compression hängt natürlich von der drückenden Kraft ab. In hinreichender Entfernung von der freien Oberfläche der Flüssigkeit und von den Wänden des Gefäßes hat die drückende Schichte eine Dicke, welche dem Halbmesser der Wirkungssphäre der kleinsten Theile gleich ist, und die Compression ist demnach für alle so gelegenen Schichten gleich groß, wenn man von der geringen Compression, welche von der Schwere herrührt, und sich mit der Entfernung von der Oberfläche ändert, absieht. Man kann daher annehmen, im Innern einer flüssigen Masse seien alle Theile in einem gleichen Zustande der Compression. Die an der Oberfläche befindlichen Theile sind entweder gar nicht, oder doch nicht mehr zusammengedrückt, als es der etwa vorhandene und zum Fortbestehen des tropfbaren Zustandes oft sogar nöthige äußere Druck mit sich bringt. Die zunächst unter der Oberfläche liegenden erleiden durch die oberflächlich liegenden schon eine geringe Compression, die noch tiefer einwärts liegenden eine noch größere, und so kommt es, daß die Dichte der Flüssigkeit von Außen nach Innen bis zu einer allerdings nur sehr geringen Tiefe nach einem uns unbekannten Gesetze zunimmt. In der Nähe der Gefäßwände ist die Dichte der Flüssigkeit aus ähnlichen Gründen von derjenigen im Innern verschieden. Wirken diese Wände nicht auf die flüssigen Theile, so verhalten sich die letzteren so, wie an der freien Oberfläche; wirken sie auf die Flüssigkeit, so modificiren sie das Gesetz der Dichte, und können sogar durch ihre Anziehung bewirken, daß die Dichte von der Wand nach Einwärts bis zu einer gewissen Entfernung abnimmt, und die Theile der an der Wand anliegenden Schichte ihre große Verschiebbarkeit verlieren.

§. 509. Die Untersuchung über das Gleichgewicht tropfbarer Flüssigkeiten zerfällt in drei Theile. Im ersten werden die Gesetze des Gleichgewichts betrachtet, welche sich aus der leichten Verschiebbarkeit der Theile ergeben und gelten, was immer für Kräfte auf sie wirken mögen; im zweiten werden bloß die Wirkungen der Schwere betrachtet, jene der Molecularkräfte aber unbeachtet gelassen; im dritten endlich werden auch die Molecularkräfte gehörig beachtet.

A. Allgemeine Gesetze des Gleichgewichts tropfbarer Flüssigkeiten ohne Rücksicht auf die Kräfte, welche auf dieselben wirken.

§. 510. In einer flüssigen Masse pflanzt sich die Wirkung einer Kraft, welche nur nach einer bestimmten Richtung zielt, nach allen Richtungen mit gleicher Stärke fort.

Digitized by Google

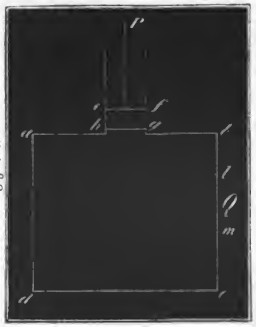


Fig. 150.

Es ist dieser Satz eine unmittelbare Folge aus der absolut leichten Verschiebbarkeit der kleinsten Theile einer Flüssigkeit. Gesetzt es sei abcd (Fig. 150) ein von allen Seiten geschlossenes Gefäß und mit einer Flüssigkeit gefüllt; über einer Oeffnung gh desselben sei ein dicht anschließender Kolben efgh, welcher mit der Kraft P abwärts gedrückt wird. Dieser Druck wirkt zwar unmittelbar nur auf die Wassertheilchen, welche die untere Kolbenfläche berühren, pflanzt sich aber durch diese nach allen Richtungen fort. Die nach Abwärts gerichtete Fortpflanzung ist für sich klar, weil nach dieser Richtung die Kraft P wirkt, aber wegen der Fähigkeit jedes einzelnen Theilchens, nach allen Richtungen gleich leicht auszuweichen, muß sie auch nach den Seitenwänden erfolgen, und zwar wird jedes Stück sowohl des Bodens cd, als auch der Wände ad, bc, ah, gb, welches der Kolbenfläche an Flächeninhalt gleich ist, mit der Kraft P auswärts gedrückt. Verhält sich daher die Fläche gh zur Fläche des Stücks lm wie $\alpha : \beta$, und nennt man den Druck, welchen lm in Folge der Einwirkung der Kraft P auf gh erleidet, Q, so ist $P : Q = \alpha : \beta$. Denkt man sich eine Oeffnung bei lm, und diese durch einen Kolben geschlossen, auf welchen die Kraft Q nach Einwärts wirkt, so halten die Kräfte P und Q einander das Gleichgewicht.

§. 511. Auf dem vorhergehenden Paragraphen und zugleich auf der sehr geringen Zusammendrückbarkeit einer Flüssigkeit beruht die **Bramah'sche oder hydraulische Presse**

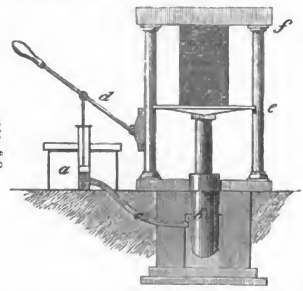


Fig. 151.

Sie besteht im Wesentlichen aus zwei verticalen, cylindrischen, mit Wasser gefüllten Gefäßen a und b (Fig. 151) von ungleichen Durchmessern, welche mittelst einer Röhre c mit einander verbunden sind, und in deren jedem sich ein Kolben bewegt. Wird der Kolben des engeren mittelst eines Hebels d auch nur mit mäßiger Kraft herabgedrückt, so wirkt dieser Druck verstärkt auf den größeren Kolben. Damit bei dem Zurückziehen des kleineren Kolbens der größere nicht zurückgehen könne, ist in der Verbindungsröhre beider Cylinder ein Ventil angebracht, welches sich nur nach dem weiteren Cylinder öffnet. Um mit jedem Spiel des kleineren Kolbens den größeren vorwärts zu bringen, ist mit jenem ein Wassergefäß mit einem Ventil in Verbindung, aus welchem bei jedem Hub des kleineren Kolbens eine neue Portion Wasser in den Cylinder dringt, ohne beim Sinken des Kolbens wieder in dasselbe Gefäß zurückkehren zu können. Nur wenn man

Digitized by Google

die Communication zwischen dem größeren Cylinder und dem Wassergefäß herstellt, kann das Wasser wieder aus jenem in dieses gelangen, worauf der Kolben durch sein eigenes Gewicht sinkt, und dem Drucke auf den Körper, welcher sich zwischen der Kolbenplatte e und dem Gerüste der Presse f befindet, ein Ende macht. Es ist leicht, die Kraft zu berechnen, mit welcher ein bestimmter, unmittelbar am äußersten Hebelarm angebrachter Druck auf den größeren Kolben wirkt. Sie sei x, während die Kraft, welche am Hebelende wirkt, p sei. Ferner sei D der Durchmesser des größeren, d derjenige des kleineren Kolbens, A die Länge des größeren, a die des kleineren Hebelarms. Nun wird die am Hebelende wirkende Kraft p durch den Hebel in dem Verhältniß a : A, und durch die ungleiche Dicke der Kolben in dem Verhältniß $d^2 : D^2$ verstärkt, und es ist daher $p : x = ad^2 : AD^2$, folglich $x = \frac{pAD^2}{ad^2}$.

§. 512. Eine andere Folge der absoluten Verschiebbarkeit der Theilchen ist, daß eine flüssige Masse nur dann im Gleichgewicht stehen kann, wenn sich die auf jedes einzelne Theilchen wirkenden Kräfte für sich im Gleichgewichte befinden, mithin wenn sich diese Kräfte selbst aufheben, oder durch einen Widerstand aufgehoben werden. Einen solchen Widerstand leisten die Wände der Gefäße durch ihre Festigkeit, auch die Theile tropfbarer Flüssigkeiten durch ihre sehr geringe Zusammendrückbarkeit. Hieraus geht hervor, daß das Gleichgewicht einer flüssigen Masse nicht gestört wird, wenn man einen Theil derselben durch eine feste Wand ersetzt, welche durch ihre Festigkeit dasselbe leistet, was die von ihr verdrängten flüssigen Theile durch ihre geringe Zusammendrückbarkeit zu leisten vermochten; oder umgekehrt, wenn man an die Stelle einer festen Wand flüssige Theile setzt.

§. 513. Bei einer Flüssigkeit in einem offenen Gefäße muß für den Zustand des Gleichgewichts die Oberfläche so gestaltet sein, daß die Richtungen der auf sie wirkenden Kräfte auf ihr senkrecht stehen. Denn wäre das nicht der Fall, so könnte jede Kraft in zwei Kräfte zerlegt werden, von welchen eine in der zu ihrem Angriffspunkte gehörigen Berührungsebene wirken, und daher ein Hingleiten der Theile längs derselben verursachen würde.

B. Gesetze des Gleichgewichts schwerer tropfbarer Körper ohne Rücksicht auf Molecularkräfte.

§. 514. Tropfbare Flüssigkeiten nehmen in größerer Menge immer die Form des Gefäßes an, in welchem sie sich befinden.

Denn befindet sich eine schwere Flüssigkeit in hinreichender Menge in einem Gefäß, so muß der Druck der oberen Theile auf die unteren ein Auseinanderfließen der tropfbaren Masse bewirken, das nur durch den Widerstand des Gefäßes aufgehoben wird.

Ist das Gefäß offen, oder füllt die Flüssigkeit das Gefäß nicht ganz an, so muß sich die Gestalt der Oberfläche der Flüssigkeit einem Kugelsegmente in dem Maße nähern, in welchem sich die Gestalt der Erde einer Kugel nähert (Meer); denn nur in diesem Falle steht die Richtung der Schwere jedes Theilchens auf der Oberfläche senkrecht, vergl. §. 513. In

Digitized by Google

kleineren Gefäßen kann man die Richtungen der Schwere für parallel halten, und daher, insofern nämlich von der Molecularwirkung der Gefäßwände auf die Flüssigkeit abgesehen wird, annehmen, die Oberfläche der Flüssigkeit liege in einer horizontalen Ebene. Diese horizontale Ebene heißt der Spiegel oder das Niveau der Flüssigkeit.

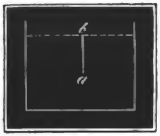


Fig. 152.

§. 515. Durch die Schwere erleiden alle Theile einer Flüssigkeit einen Druck nach Abwärts, und daher nach §. 510 auch einen Druck nach allen Seiten. Um diesen Druck für ein Theilchen im Innern der Masse ermessen zu können, denke man sich in ihr ein solches unendlich kleines Theilchen a (Fig. 152), von welchem man leicht sieht, daß es durch das Gewicht der Säule ab abwärts, mithin auch ebenso stark seitwärts und aufwärts gedrückt wird. Es hängt daher dieser Druck von der Tiefe des Theilchens a unter der Oberfläche der Flüssigkeit ab, und Theilchen, welche in einer mit der Oberfläche parallelen Fläche (also bei kleinen Massen in derselben horizontalen Ebene) liegen, erleiden einen gleichen Druck nach allen Seiten. Daß kein Theilchen ausweicht, kommt von dem Gegendruck der übrigen her.

§. 516. Eine Flüssigkeit steht in Communicationsgefäßen (d. h. Gefäßen, welche so mit einander verbunden sind, daß eine Flüssigkeit frei aus einem in die übrigen übertreten kann) im Gleichgewicht, wenn die Oberflächen derselben in allen Schenkeln des Gefäßes in dieselbe horizontale Ebene fallen.

Fig. 153.

amb (Fig. 153) sei ein mit einer Flüssigkeit gefülltes Gefäß und ab horizontal, so kann man im Innern eine feste Wand ced entstehen lassen, ohne daß dadurch dem Gleichgewicht Abbruch gethan wird (§. 512). Es werden daher auch in dem Gefäße acedbma die Oberflächen ac und db der Flüssigkeit in derselben Horizontalebene liegen, mögen übrigens die Wände des Gefäßes wie immer beschaffen sein.

§. 517. Wenn ein Gefäß mit ebenem, horizontalem Boden und verticalen Wänden von einer Flüssigkeit erfüllt ist, so drückt jedes Theilchen auf den Boden; es wird daher der gesammte Bodendruck P gleich sein dem absoluten Gewicht der Flüssigkeit, mithin dem Produkte aus der Grundfläche g des Gefäßes, der Höhe h der Flüssigkeit und dem specifischen Gewichte S derselben, so daß $P = ghS$ ist.

§. 518. In jedem anderen Gefäß von was immer für einer Gestalt ist der Bodendruck von der Menge der Flüssigkeit ganz unabhängig, und richtet sich ebenfalls nur nach der Grundfläche des Gefäßes, der Höhe und dem specifischen Gewicht der Flüssigkeit.

Digitized by Google

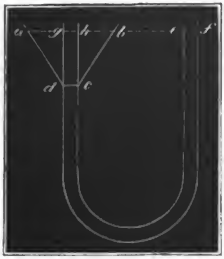


Fig. 154.

Es sei das Gefäß abcd (Fig. 154) mit einer Flüssigkeit bis ab gefüllt, und man denke es sich als ein Stück eines Communicationsgefäßes abef. In diesem muß nach §. 516 Gleichgewicht herrschen, sobald die Flüssigkeit bis ab und ef reicht, es mag nun das unregelmäßige Gefäß abcd oder das regelmäßige, mit verticalen Wänden versehene gdch den zweiten Arm ausmachen. In beiden Fällen wird cd von Oben nach Unten und von Unten nach Oben mit gleichen Kräften gedrückt. Aber der Druck von Unten nach Oben bleibt sich gleich, so lange an dem Schenkel cdef Nichts geändert wird; es muß daher dasselbe auch von dem Drucke gelten, welchen cd von Oben nach Unten erleidet. Der Druck auf cd ist demnach in beiden Gefäßen gleich groß.

Nach der gegebenen Herleitung leuchtet ein, daß der Bodendruck sich vollständig gleich bleibe, so lange die Größe der Bodenfläche, und die Höhe der Flüssigkeit in dem Gefäße dieselbe ist, das Gefäß mag wie auch immer sonst gestaltet sein, also auch dann, wenn es sich nach Oben sehr bedeutend verengt. Daraus geht aber hervor, daß man, wenn man in dem letzteren Falle dem Gefäße eine große Bodenfläche und eine bedeutende Höhe gibt, durch eine verhältnißmäßig kleine Flüssigkeitsmenge einen sehr beträchtlichen Druck erzeugen könne. Hierauf gründet sich Wolf's anatomischer Heber und Real's Extractpresse.

§. 519. In Communicationsgefäßen verhalten sich die Höhen der Säulen ungleichartiger, im Gleichgewichte stehender Flüssigkeiten umgekehrt wie ihre specifischen Gewichte.

Fig. 155.

Das Communicationsgefäß G (Fig. 155) sei mit Queckſilber so gefüllt, daß es bis a und b reicht; das Queckſilber wird im Gleichgewicht stehen, wenn a und b in derselben horizontalen Ebene liegen. Gießt man nun auf a irgend eine andere leichtere Flüssigkeit, z. B. Weingeist, bis c, so wird das Queckſilber von a etwa bis d zurückweichen, hingegen im anderen Schenkel bis e steigen. Man denke sich d und f in derselben Horizontalebene, bezeichne die Höhe der Säule dc mit α, diejenige der Säule fe mit α', das specifische Gewicht des Weingeistes mit s, das des Queckſilbers mit s', den Querschnitt der Röhre bei d mit δ, so ist der Druck auf δ von Seiten des Queckſilbers $\alpha'\delta s'$, von Seiten des Weingeistes $\alpha\delta s$, also ist für den Zustand des Gleichgewichts $\alpha'\delta s' = \alpha\delta s$ oder $\alpha' s' = \alpha s$ und deßhalb $\alpha : \alpha' = s' : s$.

§. 520. Daß jeder Punkt der Seitenwand eines mit Flüssigkeit gefüllten Gefäßes einen Druck erleidet, geht schon aus §. 510 hervor. Nach §. 515 richtet sich die Größe dieses Druckes nach der Tiefe des gedrückten Theiles unter der Oberfläche der Flüssigkeit.

Digitized by Google

Fig. 156.

So wird offenbar der Druck auf ein sehr kleines Flächenstückchen bei e (Fig. 156) durch das Gewicht der Flüssigkeitssäule ge, und der auf ein eben solches Flächenstückchen bei f durch das Gewicht der Säule hf gemessen. Ein Stück der Seitenwand also, dessen höchster Punkt in der Tiefe ge, und dessen tiefster Punkt in der Tiefe hf unter der Oberfläche der Flüssigkeit liegt, erleidet einen Totaldruck, welcher dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule gleich kommt, deren Grundfläche die Fläche des gedrückten Stückes, deren Höhe aber $> ge$ und $< hf$ ist, aber nicht in allen Fällen genau nur durch Anwendung der Elementarmathematik gefunden werden kann, da sie von dem Schwerpunkt der gedrückten Stelle aus gemessen werden muß.

Durch den Seitendruck bekommt der gedrückte Theil ein Bestreben, sich nach der Richtung des Druckes fortzubewegen. Es kommt aber gewöhnlich zu keinem Erfolge, weil ein gegenüberstehender Theil einer hinlänglich festen Wand ein gleiches Bestreben nach entgegengesetzter Richtung erhält. Bringt man aber auf einer Seite der Wand eine Oeffnung an, so findet daselbst kein Druck mehr statt, und die gegenüberstehende Wand muß sich fortbewegen. Hierauf beruht Segner's Wasserrad.

§. 521. Jeder feste Körper, welcher ganz oder nur zum Theil unter Wasser getaucht ist, wird durch eine Kraft, welche dem Gewichte des von dem Körper verdrängten Wassers gleich ist, vertical nach Oben gedrückt. Diese Kraft heißt der Auftrieb des Wassers.

Fig. 157.

Es sei AB (Fig. 157) der Wasserspiegel, abcd eine in Gedanken abgesonderte Wassermasse. Der Druck, welcher auf dieselbe von dem umgebenden Wasser von Oben nach Unten ausgeübt wird, ist offenbar dem Drucke auf die Fläche cd gleich, also gleich dem Gewichte der Wassersäule cdfe; der Druck, mit welchem das umgebende Wasser die Wassermasse abcd von Unten nach Oben zu bewegen sucht, ist ebenso dem Drucke auf die Fläche ab gleich, d. h. gleich dem Gewichte der Wassersäule abef oder gleich dem Gewichte von cdfe vermehrt um das Gewicht von abcd. Es ist also der Druck von Unten nach Oben um das Gewicht von abcd größer, als der Druck von Oben nach Unten. An diesen Verhältnissen kann aber offenbar Nichts sich ändern, wenn man auch statt der Wassermasse abcd an ihrer Stelle sich einen festen Körper denkt, welcher genau dasselbe Volumen einnimmt. Daß aus der Action der umgebenden Flüssigkeit auf den Körper keine horizontal wirkende Kraft erzeugt werde, geht daraus hervor, daß jeder auf ein Theilchen der Begrenzung des Körpers stattfindende horizontale Druck durch den auf ein gegenüber liegendes Theilchen ausgeübten aufgehoben wird.

Als eine unmittelbare Folge des Auftriebs ergibt sich, daß jeder schwere Körper in einer Flüssigkeit so viel von seinem Gewichte verliert, als die durch ihn verdrängte Flüssigkeit wiegt. Da dieser Satz zuerst von Archi-

Digitized by Google

medes (250 v. Chr.) aufgefunden wurde, so heißt er nach ihm das Archimedische Prinzip. Heißt das Gewicht eines Körpers im leeren Raume P, das der Flüssigkeit von demselben Volumen p, so ist das Gewicht des Körpers in der Flüssigkeit $P - p$. Ist $P > p$, so sinkt der Körper natürlich in der Flüssigkeit zu Boden; ist $P = p$, so verhält er sich in ihr wie eine schwerlose Masse, d. h. er schwebt; ist endlich $P < p$, so steigt er in die Höhe, bis nur ein Stück von ihm eingetaucht ist, und bis die verdrängte Flüssigkeit nur noch so viel wiegt, als der ganze eingetauchte Körper. P und p als die absoluten Gewichte zweier Körper (des eingetauchten festen Körpers und der Flüssigkeit) von gleichem Volumen verhalten sich aber auch zu einander wie die specifischen Gewichte dieser Körper. Man kann daher den Satz auch so ausdrücken: Ein in eine Flüssigkeit eingetauchter und dann sich selbst überlassener Körper sinkt zu Boden, bleibt schweben oder steigt aufwärts, je nachdem er specifisch schwerer, ebenso schwer oder leichter ist, als die Flüssigkeit.

§. 522. Da auf einen Körper, welcher sich in einer Flüssigkeit befindet, zwei Kräfte wirken, nämlich 1) sein Gewicht, welches ihn abwärts zieht, und in seinem Schwerpunkte vereinigt gedacht werden kann, und 2) der Druck der Flüssigkeit, welcher ihn aufwärts treibt, dem Gewichte der verdrängten Flüssigkeitsmasse gleich ist, und den vormaligen Schwerpunkt derselben zum Angriffspunkte hat, so hängt das Gleichgewicht eines Körpers in einer Flüssigkeit bloß von der Wirkung zweier Kräfte ab, welche nach verticalen, aber entgegengesetzten Richtungen wirken, und an den Endpunkten einer beide Schwerpunkte verbindenden graden Linie angebracht sind. Damit also ein Körper in einer Flüssigkeit sich im Gleichgewichte befinde, wird erfordert, 1) daß sein Gewicht demjenigen der verdrängten Flüssigkeit gleich sei, und 2) daß der Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeit und der Schwerpunkt des eingetauchten Körpers in derselben verticalen Linie liegen. Vermöge der ersten Bedingung kann er nicht steigen oder sinken, d. h. er schwimmt; vermöge der zweiten kann er sich nicht drehen. Die erste Bedingung kann offenbar nur bei Körpern erfüllt werden, deren specifisches Gewicht nicht größer, als jenes der Flüssigkeit, ist. In Beziehung auf die zweite Bedingung kann man füglich annehmen, daß es für jeden Körper eine oder mehrere Lagen gibt, in welchen auch sie erfüllt wird. Wenn aber auch der zweiten Bedingung Genüge geschieht, so ist doch noch zu beurtheilen, ob das Gleichgewicht des schwimmenden Körpers stabil oder labil sei (§. 391).

Fig. 158.

Zu diesem Ende denke man sich denselben durch eine sehr geringe Neigung aus seiner Gleichgewichtslage gebracht, und untersuche, ob er jetzt in seine frühere Stellung zurückzukehren, oder sich von derselben noch mehr zu entfernen strebt. Es sei G (Fig. 158) der Schwerpunkt des bereits in geneigter Stellung befindlichen Körpers, Gx die grade Linie, welche in der Gleichgewichtslage des Körpers eine verticale Stellung hatte, in welcher sich daher auch der Schwerpunkt der von dem Körper verdrängten Flüssigkeit befand, und man lasse den Winkel, welchen Gx mit der verticalen Richtung Gz bildet,

Digitized by Google

sehr klein sein. Der Schwerpunkt der jetzt verdrängten Flüssigkeit liege in F. Nehmen wir, um einen leicht fasslichen Fall vor Augen zu haben, an, der Körper sei zu beiden Seiten einer Ebene, in welcher Gx liegt, wenigstens so weit er in die Flüssigkeit taucht, symmetrisch gebaut, und diese Ebene bleibe während der Neigung desselben vertical, so daß auch Gz in derselben liegt. Der Schwerpunkt F wird nothwendig ebenfalls in dieser Ebene liegen, mithin muß die durch ihn gehende Verticallinie Fy der Linie Gx in einem Punkte M begegnen. Man nennt diesen Punkt das Metacentrum des schwimmenden Körpers, und kann ihn als den Angriffspunkt der den Körper in seiner jetzigen geneigten Lage aufwärts treibenden Kraft ansehen. Hier zeigt sich nun augenscheinlich, daß die zwei Kräfte, welche den Körper beherrschen, ihn gegen seine frühere Lage hinzutreiben suchen, wenn der Schwerpunkt G tiefer liegt, als das Metacentrum M, und daß sie die Abweichung des Körpers von seiner Gleichgewichtslage noch zu vergrößern suchen, wenn G höher liegt, als M. Im ersten Fall hatte der Körper ein stabiles, in dem zweiten ein labiles Gleichgewicht. Weil der Schwerpunkt F der verdrängten Flüssigkeit in der geneigten Lage des Körpers von jenem in der Gleichgewichtslage bei so geringer Verrückung des Körpers nur sehr wenig abweichen kann, also in der Nähe von Gx bleiben muß, so sieht man leicht ein, daß der erste Fall ganz gewiß vorhanden ist, wenn der Schwerpunkt des Körpers in der Gleichgewichtslage unter dem Schwerpunkte der verdrängten Flüssigkeit liegt.

Fig. 159.

Findet aber das Umgekehrte statt, so läßt sich im Allgemeinen Nichts Bestimmtes sagen, denn es kann hierbei, wie aus Fig. 159 ersichtlich ist, in welcher die Buchstaben dieselbe Bedeutung wie in Fig. 158 haben, das Metacentrum sowohl über als unter dem Schwerpunkte des Körpers erscheinen, mithin das Gleichgewicht sowohl stabil, als labil sein. Befindet sich also der Schwerpunkt des in einer Flüssigkeit im Gleichgewichte schwimmenden Körpers unter dem Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeit, so hat der Körper Stabilität; ist er in dem labilen Zustande, so liegt gewiß der Schwerpunkt des Körpers höher, als jener der Flüssigkeit. Beide Sätze dürfen jedoch nicht allgemeingültig umgekehrt werden.

§. 523. Da die Bestimmung der Umstände, unter welchen ein Körper in einer Flüssigkeit in die Höhe steigt oder niedersinkt, sich nur auf die Betrachtung des Druckes gründet, welchen die Flüssigkeit auf jeden ihrer Theile ausübt, so bleiben diese Umstände ganz dieselben, wenn eine Flüssigkeit statt eines festen Körpers in eine Flüssigkeit gebracht wird, und §. 521 findet dann auch noch seine Anwendung, so lange nicht beide Flüssigkeiten sich chemisch mit einander verbinden.

Eine Anwendung hiervon hat man in der Libelle oder Wasserwage gemacht. Sie dient dazu zu untersuchen, ob eine Ebene vollkommen horizontal sei oder nicht. Das Instrument besteht aus einer cylindrischen Glasröhre, die größtentheils mit Spiritus (weil dieser in der Kälte nicht gefriert) gefüllt, und, nachdem sie hermetisch geschlossen worden, auf einer mit der Axe des Cylinders parallelen Grundfläche befestigt ist. Hat dann die Axe des Cy-

Digitized by Google

linders eine horizontale Lage, so muß die Luftblase an der obersten Stelle in der Mitte der cylindrischen Röhre sich befinden. Ist dies der Fall, so zeigt es an, daß die Ebene, auf welcher die Libelle mit ihrer Grundfläche steht, wenigstens nach der Richtung der Libelle horizontal ist. Damit aber die Luftblase sich bei der richtigen Stellung in der Mitte halte, und bei geringer Neigung nur nach und nach sich von der Mitte entferne, muß die Röhre eine allerdings sehr geringe Krümmung ihrer Axe haben, und diese Krümmung muß desto mehr einem großen Halbmesser zugehören, je mehr Empfindlichkeit man von dem Instrumente verlangt. Nur eine Modification der cylinderförmigen Libelle ist die Dosenlibelle, bei welcher der Weingeist statt in eine cylindrische Röhre in ein kleines dosenförmiges Glasgefäß eingeschlossen ist. Von diesen Wasserwagen muß ein anderes Instrument, das wohl auch den Namen Wasserwage führt, aber auch Canalwage heißt, unterschieden werden. Es dient dem Geometer zu demselben Zwecke, wie die Libellen, nur kann man nicht einen gleich hohen Grad der Genauigkeit mit ihm erreichen. Es besteht aus einer blechernen Röhre, an jedem Ende mit einer vertical aufstehenden Fassung, in welche eine etliche Zoll hohe, eingetheilte Glasröhre gekittet ist. Die Verwendbarkeit dieses Apparates zu dem angegebenen Zwecke beruht auf dem schon besprochenen Satze, daß in Communicationsröhren die Oberflächen einer Flüssigkeit für den Zustand des Gleichgewichts in eine und dieselbe horizontale Ebene fallen.

§. 524. Das Volumen des eingetauchten Theiles eines Körpers verhält sich zum Volumen des ganzen Körpers, wie das specifische Gewicht dieses Körpers zu jenem der Flüssigkeit.

V sei das Volumen des ganzen Körpers, v dasjenige des eingetauchten Theiles, S das specifische Gewicht des Körpers, s das der Flüssigkeit und $s > S$, P endlich sei das absolute Gewicht des Körpers. Nun ist $P = VS$, das absolute Gewicht der verdrängten Flüssigkeit ist aber $= vs$, und weil nach §. 521 der Körper so lange in die Höhe steigt, bis die verdrängte Flüssigkeit nur noch so viel wiegt, als der ganze eingetauchte Körper, muß auch $P = vs$ sein; es ist also $VS = vs$ oder $v : V = S : s$.

§. 525. Die in verschiedene Flüssigkeiten eingetauchten Theile desselben Körpers verhalten sich umgekehrt wie die specifischen Gewichte dieser Flüssigkeiten.

Die specifischen Gewichte der beiden Flüssigkeiten seien s und s', v und v' seien die Volumina des eingetauchten Theiles, so ist $P = vs$ und $P = v's'$, folglich $vs = v's'$ und $v : v' = s' : s$.

§. 526. Sollen zwei verschiedene Körper in zwei verschiedene Flüssigkeiten eintauchen, so daß von beiden ein gleiches Volumen eingetaucht ist, so müssen sich die absoluten Gewichte derselben verhalten, wie die specifischen Gewichte der Flüssigkeiten.

P und P' seien die absoluten Gewichte der eingetauchten Körper, s und s' die specifischen Gewichte der Flüssigkeiten, v sei bei beiden Körpern das Volumen des eingetauchten Theiles. Nun ist $P = vs$ und $P' = vs'$, folglich $P : P' = vs : vs'$ oder $P : P' = s : s'$.

§. 527. Ein kugelförmiger Körper, dessen specifisches Gewicht größer ist, als das des Wassers, ist gegeben; man soll bestimmen, wie groß der kugel-

Digitized by Google

förmige Theil seiner Masse ist, welcher von Innen weggenommen werden muß, damit der Körper im Wasser schwimme.

Der Halbmesser des Körpers sei R, sein specifisches Gewicht S, das des Wassers s, und $S > s$. Das absolute Gewicht des Körpers ist nun $\frac{4}{3}\pi R^3 S$, und das des Wassers von gleichem Volumen $\frac{4}{3}\pi R^3 s$. Heißt der zu findende Halbmesser der wegzunehmenden Masse x, und läßt sich mithin sein Gewicht durch $\frac{4}{3}\pi x^3 S$ ausdrücken, so wird die gegebene Kugel schwimmen, wenn $\frac{4}{3}\pi R^3 S - \frac{4}{3}\pi x^3 S = \frac{4}{3}\pi R^3 s$ oder $R^3 S - x^3 S = R^3 s$, $R^3 S - R^3 s = x^3 S$, $R^3 \times (S - s) = x^3 S$, $\frac{S - s}{S} \cdot R^3 = x^3$ und $x = R \sqrt[3]{\frac{S - s}{S}}$ ist.

§. 528. Es soll ein Körper durch Verbindung mit einem specifisch leichteren zum Schwimmen gebracht werden, und es soll das absolute Gewicht des letzteren bestimmt werden.

P sei das absolute, S das specifische Gewicht des Körpers, welcher zum Schwimmen gebracht werden soll; eben diese Bedeutung mögen p und s für den specifisch leichteren Körper haben, während σ das specifische Gewicht des Wassers bedeute. Da der Körper schwimmen wird, wenn sein Gewicht sammt demjenigen des damit verbundenen Körpers dem Gewichte des verdrängten Wassers gleich ist, und da das Volumen eines Körpers gefunden wird, wenn man sein absolutes Gewicht durch sein specifisches dividirt, so hat man folgende Gleichung: $P + p = \left(\frac{P}{S} + \frac{p}{s}\right)\sigma$, $P + p = \frac{P\sigma}{S} + \frac{p\sigma}{s}$, $P - \frac{P\sigma}{S} = \frac{p\sigma}{s} - p$, $\frac{PS - P\sigma}{S} = \frac{p\sigma - ps}{s}$, $\frac{P(S - \sigma)}{S} = \frac{p(\sigma - s)}{s}$, und $p = \frac{Ps(S - \sigma)}{S(\sigma - s)}$.

§. 529. Das specifische Gewicht tropfbarer und fester Körper erhält man auf hydrostatischem Wege entweder mittelst der sog. hydrostatischen Wage oder mittelst der Aräometer (ἀραιός dünn, μέτρον Maß). Die hydrostatische Wage unterscheidet sich von der gewöhnlichen Wage nur dadurch, daß die eine Wagschale kürzer aufgehängt ist, und dabei auf der unteren Seite noch ein Häkchen hat, um mittelst eines Fadens den Körper, der unter Wasser abgewogen werden soll, daran aufhängen zu können. Wir wollen nun zunächst zeigen, wie das specifische Gewicht vermittelst der hydrostatischen Wage gefunden wird.

§. 530. Es soll das specifische Gewicht einer tropfbaren Flüssigkeit bestimmt werden.

Man wäge einen festen Körper, dessen Gewichtsverlust p im reinen Wasser man kennt, in der zu untersuchenden Flüssigkeit sorgfältig ab, und bestimme den darin erlittenen Gewichtsverlust q. Nennt man das zu suchende specifische Gewicht S, so ist $S : 1 = q : p$, und also $S = \frac{q}{p}$. Es versteht sich von selbst, daß der eingetauchte Körper weder im Wasser, noch in der zu prüfenden Flüssigkeit auflöslich sein darf, und daß er sich in beide ganz einsenken muß.

Bei dieser Gelegenheit wollen wir auch noch ein anderes, gleichfalls hydrostatisches Verfahren anführen, wenngleich die hydrostatische Wage bei demsel-

Digitized by Google

den nicht in Anwendung kommt. Man bringt nämlich die zu untersuchende Flüssigkeit in den einen Schenkel eines communicirenden Gefäßes, und destillirtes Wasser in den anderen, trennt, wenn beide Flüssigkeiten etwa sich mit einander zu mischen geneigt sind, sie durch eine dritte, gegen beide indifferente Flüssigkeit von einander, und mißt die Höhe der zwei Säulen, wenn das Gleichgewicht hergestellt ist. Diese Höhen verhalten sich dann nach §. 519 umgekehrt wie die specifischen Gewichte.

Ferner erwähnen wir die Bestimmung des specifischen Gewichts tropfbarer Flüssigkeiten vermittelst des Pyknometers (πυκνός dicht, μέτρον Maß) oder Tausendgranfläschchens. Es ist dies ein Glasfläschchen, welches genau 1000 Gran destillirtes Wasser von einer bestimmten Temperatur faßt. Auf den oberen abgeschliffenen Rand desselben paßt ein gleichfalls abgeschliffenes ebenes Glasplättchen, das in der Mitte eine kleine Oeffnung hat, damit, wenn das Fläschchen mit einer Flüssigkeit gefüllt wird, die überschüssige Flüssigkeit durch dieselbe austreten kann. Ist nun das Fläschchen mit der auf ihr specifisches Gewicht zu prüfenden Flüssigkeit vollständig gefüllt, und äußerlich sorgfältig abgetrocknet, so bringt man es auf die eine Schale einer feinen Wage, und sieht, wie viele Gran man auf der anderen Schale noch zu dem Gewichte des leeren Fläschchens zulegen muß, damit der Wagbalken sich genau horizontal stelle. Dividirt man die Anzahl der Gran durch 1000, indem man die drei letzten Ziffern als Decimalstellen abschneidet, so ist das specifische Gewicht gefunden. Die Richtigkeit des Verfahrens geht unmittelbar aus dem Begriff des specifischen Gewichts hervor, indem hier die absoluten Gewichte bei gleichem Volumen verglichen werden.

§. 531. Es soll das specifische Gewicht eines festen Körpers bestimmt werden.

Man sucht zuerst sein absolutes Gewicht P, und dann seinen Gewichtsverlust p im Wasser, oder, wenn dieses ihn auflöst, in einer anderen Flüssigkeit, deren specifisches Gewicht s schon bestimmt ist. Im ersteren Falle ist das specifische Gewicht S des festen Körpers $= \frac{P}{p}$. Im letzteren Falle verhält sich $S : s = P : p$, und S ist demnach $= \frac{P}{p} \cdot s$.

Gepulverte Körner wägt man auf einer gläsernen Schale, deren absolutes Gewicht und Gewichtsverlust in einer gegebenen Flüssigkeit schon vorher bestimmt worden sind. Sollte der Körper specifisch leichter sein, als die Flüssigkeit, in welcher man ihn abwägen will, so verbindet man ihn mit einem Körper, der specifisch schwerer ist, als die Flüssigkeit, und wägt ihn sammt demselben in der Flüssigkeit, zieht aber alsdann von dem gesammten Gewichtsverlust denjenigen des schwereren Körpers ab.

§. 532. Von Aräometern oder Senkwagen müssen zwei Arten unterschieden werden, nämlich Aräometer mit Gewichten und Aräometer mit Scalen. Von den ersteren ist das Nicholson'sche das bekannteste; es besteht aus einem hohlen Cylinder von Messingblech, der oben und unten in einen Kegel ausläuft. An der Spitze des unteren Kegels befindet sich ein Häkchen, an dem ein Eimerchen hängt, die Spitze des oberen Kegels läuft in einen Draht aus, der eine kleine Schale zur Auflegung von Gewichten trägt. An dem durch den Draht gebildeten sehr dünnen Halse ist ein feiner Strich

Digitized by Google

markirt. Mohs änderte das Instrument dahin ab, daß er unmittelbar unter dem Halse den cylindrischen Körper durch ein Schälchen schloß, und dagegen das Eimerchen ganz wegließ. Die Scalenaräometer sind cylindrische, überall gleich weite Glasröhren, die sich an ihrem unteren Ende gewöhnlich erst cylinderförmig und dann noch einmal in eine kleine Kugel erweitern. In der kleinen Kugel ist entweder Quecksilber oder Schrotkörner, um zu bewirken, daß die Röhre in einer Flüssigkeit stets vertical schwimmt. Die Scale wird auf die Weise angefertigt, daß man das Aräometer zuerst in reines Wasser einsenkt, und den Punkt bemerkt, bis zu welchem es einsinkt, dann wird es noch in eine andere Flüssigkeit gebracht, deren specifisches Gewicht man genau kennt, und der Einsenkungspunkt ebenfalls bemerkt. Da der Gebrauch der Scalenaräometer auf dem Satze beruht, daß die in verschiedene Flüssigkeiten eingetauchten Theile eines Körpers sich umgekehrt wie die specifischen Gewichte dieser Flüssigkeiten verhalten, so bezeichnet man den ersten Punkt, wenn man mit dem Instrumente das specifische Gewicht bis auf 2 Decimalstellen finden will, mit 100, die dem zweiten Punkte zugehörige Zahl findet man, wenn das specifische Gewicht der zweiten Flüssigkeit s war, dann offenbar durch die Proportion $1 : s = x : 100$, woraus sich $x = \frac{100}{s}$ ergibt. Der Abstand zwischen den zwei Punkten wird nun in so viele gleiche Theile getheilt, als der Unterschied der berechneten Zahl und 100 angibt, und solche Theile werden dann auch noch aufwärts und abwärts aufgetragen. Die so bestimmten Zahlen zeigen Volumentheile an; will man daher an der Scale unmittelbar das specifische Gewicht ablesen, so muß man statt derselben ihre umgekehrten Werthe setzen. Aus der gegebenen Beschreibung geht hervor, daß man bei dem Gebrauche das Instrument nur in die zu untersuchende Flüssigkeit einzusenken und die Scale abzulesen braucht. Daß bei solchen Versuchen, wie bei allen Versuchen, durch welche das specifische Gewicht eines Körpers gefunden werden soll, stets auch auf die Temperatur des Körpers die nöthige Rücksicht genommen werden muß, braucht wohl nicht erst noch erwähnt zu werden. Wollte man ein Scalenaräometer construiren, das für alle Flüssigkeiten angewandt werden könnte, so würde die Scale desselben sehr lang und dadurch das Instrument unbequem werden; deßwegen verfertigt man eigene Instrumente für Flüssigkeiten, welche specifisch schwerer, und eigene für solche, welche specifisch leichter sind, als Wasser.

Die Scalenaräometer dienen aber auch noch zu einem anderen Zwecke. Das specifische Gewicht vieler gemischten Flüssigkeiten ändert sich nämlich mit der Menge des einen oder des anderen Bestandtheiles so, daß man, wenn einmal für ein gewisses Mischungsverhältniß das specifische Gewicht durch vorläufige Erfahrungen gefunden ist, in Zukunft umgekehrt von diesem specifischen Gewichte auf das Mischungsverhältniß schließen, und das Aräometer so einrichten kann, daß die Scale statt des specifischen Gewichtes die verhältnißmäßige Menge des einen oder des anderen Bestandtheiles anzeigt. So eingerichtete, und natürlich immer nur für eine Flüssigkeit anwendbare Aräometer heißen Procenten-Aräometer; Branntwein-, Bier-, Milchwagen u. s. w.

Man trifft häufig auch Aräometer, welche weder das specifische Gewicht, noch ein bestimmtes Mischungsverhältniß unmittelbar angeben, sondern deren Scalen in meistens willkürliche Grade eingetheilt sind. Unter allen Instrumenten

Digitized by Google

dieſer Art haben die von Beaumé die weiteſte Verbreitung gefunden; es iſt daher nothwendig anzugeben, wie Beaumé ſeine Scale beſtimmte. Dieſes geſchah auf zweifache Art, je nachdem er das Inſtrument für Flüſſigkeiten anwenden wollte, welche ſpecifiſch leichter oder ſchwerer ſind, als Waſſer. Um die Scale für erſtere zu erhalten, tauchte er ſein Aräometer, deſſen Spindel durchaus gleich dick war, in eine Auflöſung von 10 Theilen Kochſalz in 90 Theilen Waſſer, und fand ſo den unterſten Punkt der Scale, hierauf in deſtillirtes Waſſer, um einen zweiten, höher liegenden Punkt der Scale zu finden. Den Zwiſchenraum theilte er in 10 gleiche Theile, und ſetzte dieſe Eintheilung bis zu dem Ende der Röhre fort. Den Punkt des deſtillirten Waſſers bezeichnete er mit 10. Um die Scale für ſpecifiſch ſchwerere Flüſſigkeiten zu beſtimmen, tauchte er das Inſtrument in deſtillirtes Waſſer, fand ſo den oberſten Punkt, hierauf in eine Auflöſung von 15 Theilen Kochſalz und 85 Theilen Waſſer, theilte den Abſtand dieſer zwei Punkte in 15 gleiche Theile, ſetzte an den zuerſt gefundenen 0, und übertrug dieſe Eintheilung auf die ganze Spindel. Man ſieht leicht ein, daß dieſe Inſtrumente gar keinen wiſſenſchaftlichen Werth haben, und daß man nur vermittelſt einer Hilfstafel nach den Beaumé'ſchen Graden das ſpecifiſche Gewicht finden kann.

§. 533. Vermittelſt des Nicholſon'ſchen Aräometers kann das ſpecifiſche Gewicht ſowohl feſter, als auch tropfbar flüſſiger Körper beſtimmt werden. Soll dasjenige eines feſten Körpers gefunden werden, ſo darf das abſolute Gewicht deſſelben nicht ſo groß ſein, daß er, auf das obere Schälchen gelegt, das Aräometer in deſtillirtem Waſſer bis über die Marke einſinken machte. Zuerſt wird das abſolute Gewicht des Körpers geſucht, indem man ihn auf das Schälchen bringt, und dann noch ſo viele Gewichte zulegt, bis das Aräometer genau bis zur Marke einſinkt. Man ſieht nun zu, wie viele Gewichte jetzt weniger auf dem Schälchen liegen, als wenn man das Einſinken nur durch Gewichte bewirkt hat. Der Unterſchied gibt offenbar das abſolute Gewicht des feſten Körpers an. Hierauf bringt man den Körper in das Eimerchen, das Aräometer geht wegen des Gewichtsverluſtes des Körpers wieder in die Höhe. Damit es auch jetzt wieder bis zur Marke einſinke, müſſen auf das Schälchen noch Gewichte zugelegt werden. Die jetzt zugelegten Gewichte zeigen den Gewichtsverluſt des Körpers, alſo das abſolute Gewicht eines gleichen Volumens deſtillirten Waſſers an. Wird demnach das abſolute Gewicht des feſten Körpers durch dieſen Gewichtsverluſt dividirt, ſo iſt das ſpecifiſche Gewicht gefunden.

Soll das Inſtrument zur Beſtimmung des ſpecifiſchen Gewichtes tropfbar flüſſiger Körper benutzt werden, ſo muß man ſein eigenes abſolutes Gewicht kennen, und auch wiſſen, wie viel Gewicht man noch zulegen muß, damit die Einſenkung im deſtillirten Waſſer bis zu der Marke erfolge. Das erſtere ſei P, das letztere p. Will man nun das ſpecifiſche Gewicht S einer Flüſſigkeit finden, ſo ſenkt man das Inſtrument in dieſelbe, und legt ſo lange Gewichte zu, bis es zur Marke einſinkt. Heißt dieſes Gewicht p', ſo iſt $P + p : P + p' = 1 : S$,

folglich $S = \frac{P + p'}{P + p}$.

Digitized by Google

C. Gesetze des Gleichgewichts schwerer tropfbarer Körper mit Rücksicht auf Molecularkräfte.

§. 534. Es kommen unter den Erscheinungen des Gleichgewichts tropfbarer Flüssigkeiten solche vor, welche als Abweichungen von den aus der Schwere abgeleiteten Gesetzen betrachtet werden müssen. Nach den Gleichgewichtsgesetzen schwerer Flüssigkeiten soll ein tropfbarer Körper in den beiden Schenkeln eines communicirenden Gefäßes gleich hoch stehen (§. 516). Taucht man aber ein enges Röhrchen in Wasser, so erhebt dieses sich im Röhrchen, und steht zuletzt, wenn die Wand desselben gehörig naß geworden ist, bedeutend über der Oberfläche der Flüssigkeit außerhalb des Röhrchens (§. 23.), und zwar um desto höher, je geringer der Durchmesser des Röhrchens ist. Aehnliches zeigen auch andere Flüssigkeiten, welche das Rohr benetzen. Wird aber die innere Röhrenwand von der Flüssigkeit nicht benetzt, wie dieses zwischen reinem Glas und Queckfilber der Fall ist, so hat die innere Flüssigkeit einen um so tieferen Stand unter der äußeren Oberfläche, je enger die Röhre ist. Ein anderes Gleichgewichtsgesetz schwerer Flüssigkeiten verlangt, daß die Oberfläche derselben horizontal, und bei nicht sehr großen Gefäßen eben sei (§. 514). Aber auch diesem Gesetze widerspricht das Verhalten von Flüssigkeiten in engen Gefäßen. Solche Flüssigkeiten, welche das Gefäß benetzen, haben immer eine concave, solche, welche dieses nicht thun, eine convexe Oberfläche; ja selbst wenn ein Gefäß groß genug ist, um nicht die ganze Oberfläche gekrümmt erscheinen zu lassen, und dieselbe in einiger Entfernung von der Gefäßwand eben ist, so zieht sie sich doch an dieser Wand deutlich in die Höhe, wenn sie das Material des Gefäßes benetzt, und erscheint deutlich abwärts gebogen, wenn keine Benetzung stattfindet. Diese Erscheinungen zeigen deutlich, daß hier außer der Schwere noch Wirkungen anderer Kräfte sich bemerkbar machen. Ihr inniger Zusammenhang mit der Adhäsion der Flüssigkeit an der Materie des Gefäßes deutet auf eine Einwirkung dieser Materie auf die Flüssigkeit, und der Umstand, daß auch nicht an dem Gefäße adhärirende Flüssigkeiten von den durch die Schwere bedingten Gleichgewichtsgesetzen abweichen, weiset darauf hin, daß die Action der flüssigen Theile auf sich selbst hier im Spiele sei. Man nennt alle derartige Erscheinungen *Capillaritätsphänomene*, weil sie mit dem Verhalten von Flüssigkeiten in engen Röhrchen von einerlei Natur sind.

§. 535. Um nun zu einer Kenntniß des Zustandes, in welchen die Attractionskräfte (vermöge welcher 1.) zwischen allen sich berührenden Punkten einer tropfbaren Flüssigkeit eine gegenseitige Anziehung stattfindet, und 2.) jeder Punkt eines festen Körpers, der einen flüssigen berührt, oder in unmeßbar kleiner Entfernung davon ist, eine Anziehung gegen denselben äußert) die flüssigen Theile versetzen, zu gelangen, betrachten wir Punkte der Flüssigkeit nach ihrer verschiedenen Lage zu dem übrigen Flüssigen und zu den Wänden des Gefäßes.

Fig. 160.

1) Ein Punkt p (Fig. 160) im Innern der Flüssigkeit zieht das ihn umgebende Flüssige mit gleicher Kraft nach allen möglichen Richtungen, und wird von letzterem ebenso in entgegengesetzter Richtung gezogen. Dies kann weiter keine Aenderung im Gleichgewichtszustande der Flüssigkeit hervorbringen, als daß die durch die Schwere verursachte Spannung durch diese Attractionskräfte

Digitized by Google

etwas vermehrt wird, und die Flüssigkeit einen geringeren Grad der Cohäsion bekommt. 2) Ein Punkt q an der freien Oberfläche ab wird nur abwärts nach allen Richtungen gezogen, welche sich von q aus unter der Oberfläche ab ziehen lassen. Diese Anziehungen setzen sich zu einer einzigen Kraft qp zusammen. Nach Oben erleidet der Punkt q nur von der über der Oberfläche ab befindlichen Luft eine Anziehung, welche aber wegen der geringen Dichtigkeit der Luft so unbedeutend ist, daß sie außer Acht gelassen werden kann. Da nun genau dasselbe von jedem anderen Punkte der Oberfläche gilt, so wird die Cohäsion und Dichtigkeit des Flüssigen an der Oberfläche etwas vermehrt; diese Vermehrung der Dichtigkeit und Cohäsion kann aber nur bis zu unmerklicher Tiefe reichen, weil die Attractionskräfte in jeder meßbaren Tiefe auch nach Oben wirken, also die nach Unten wirkenden aufheben. 3) Ein Punkt r, welcher an der Wand des Gefäßes liegt, wird einwärts von der Flüssigkeit in allen Richtungen, und auswärts von den unmittelbar anliegenden Punkten des Gefäßes gezogen. Sowohl jene, als diese Anziehungen müssen sich in Anziehungen zusammensetzen, welche auf der Gefäßwand senkrecht sind, erstere in der Richtung rp, letztere in der Richtung rs. Diese beiden einander grade entgegengesetzten Anziehungen sind in fast allen Fällen ungleich. Wären sie gleich, so würden sie sich gegenseitig aufheben. Ist die Anziehung nach rs größer, so wird die Flüssigkeit ein Wenig gegen die Gefäßwand gedrückt; also besteht dann die ganze Wirkung der anziehenden Kräfte darin, daß das Flüssige etwas stärker an dem Gefäße haftet, als seine eigenen Theile unter sich zusammenhangen. Ist der Zug nach rp größer, als nach rs, so würde der Punkt r, wenn er sich frei bewegen könnte, nach Innen ausweichen; da er sich aber in der Tiefe br unter der Oberfläche befindet, so wird er durch einen viel größeren hydrostatischen Druck gegen die Wand getrieben, und die Wirkung der anziehenden Kräfte besteht bloß darin, daß der betrachtete Punkt r der Flüssigkeit an der umgebenden Flüssigkeit stärker haftet, als am Gefäße.

Fig. 161.

4) Der flüssige Punkt b (Fig. 161), welcher an der Gefäßwand und zugleich an der Oberfläche der Flüssigkeit liegt, wird mit gleicher Kraft von der Flüssigkeit nach allen denjenigen Richtungen gezogen, welche innerhalb des Winkels qbr möglich sind; die diesen Winkel halbirende grade Linie bp wird demnach die Mittelkraft aller dieser Attractionen sein. Die Wand des Gefäßes zieht den flüssigen Punkt b in allen Richtungen innerhalb des Winkels ubv, und diese Anziehungen setzen sich zu der Mittelkraft bt zusammen. Es ziehen zwar auch die unmittelbar über b liegenden Theile der Wand die Flüssigkeit an, allein, wie schon gezeigt wurde, hat dies keine andere Folge, als daß das Flüssige etwas gegen die Wand, oder nach Innen gedrückt wird, je nachdem die Anziehung der Wand gegen die Flüssigkeit oder diejenige der flüssigen Theile unter einander größer ist. Daher kann diese Wirkung vernachlässigt werden, was durch den Erfolg auch gerechtfertigt wird. Zerlegt man nun jede der Kräfte bp und bt in 2, nämlich in eine verticale und eine horizontale, also bp in br und bq, und bt in bu und bv, so folgt: a) ist bp = bt, so ist, da beide in derselben graden Linie wirken, auch br = bu und bq = bv, also die Flüssigkeit im

Digitized by Google

Gleichgewicht und die Oberfläche bleibt eben; b) ist bp $<$ bt, so ist auch bq $<$ bv, nach bv hin kann aber wegen der Festigkeit der Gefäßwand keine Bewegung erfolgen. Unter der gemachten Voraussetzung ist aber auch br $<$ bu, daher muß der flüssige Punkt b mit der Kraft bu — br längs der Gefäßwand in die Höhe gezogen werden. Steigt aber der Punkt b, so zieht er auch die ihm zunächst liegende Flüssigkeit mit sich, bis daß das Gewicht der über die Horizontale emporgehobenen Flüssigkeit der Kraft bu — br gleich ist. Die Oberfläche wird also concav. c) Ist endlich bp $>$ bt, so wird sich der flüssige Punkt b von dem Gefäße trennen; dann findet sich ein anderer, tiefer liegender Punkt der Flüssigkeit in die Bedingung von b versetzt, er wird sich deßhalb auch wieder von der Gefäßwand zurückziehen, und dieselbe Wirkung geht auf die nächst folgenden Punkte über, bis der hydrostatische Druck der nach Innen wirkenden Kraft bp — bt gleich ist. Die Oberfläche wird also conver.

§. 536. Es soll ein Ausdruck für die Höhe gefunden werden, bis zu welcher sich eine Flüssigkeitssäule in einem Haarröhrchen über die äußere Oberfläche erhebt.

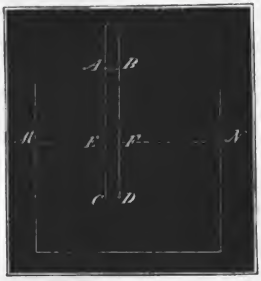


Fig. 162.

Die Kräfte, welche die Säule AEFB (Fig. 162) aufwärts ziehen, sind 1) die Anziehung, welche die über AB befindliche Röhrenwand auf die angrenzenden Wassertheilchen ausübt, sie heiße P; 2) die Anziehung, welche das untere Ende CD des Rohres auf die unter ihm stehende Wassersäule ausübt; sie muß offenbar denselben Werth P haben. Dagegen wird die Säule abwärts gezogen 1) durch ihr Gewicht Q und 2) durch die Anziehung, welche die unterhalb CD befindliche Wasserwand, welche gleichsam die Fortsetzung der inneren Röhrenwand ist, gegen die über ihr stehende Säule äußert, und welche P′ heißen mag. Alle übrigen noch vorhandenen Anziehungen heben sich gegenseitig auf. Das Gleichgewicht der Wassersäule AEFB wird also bedingt durch die Gleichung $P + P = Q + P'$ oder $2P - P' = Q$. Man kann die Kraft P als die Summe der Anziehungen betrachten, welche von unendlich vielen, unendlich schmalen Verticalstreifen, in welche sich die innere Röhrenwand zerlegen läßt, auf das anliegende Wasser ausgehen, folglich jene Kraft dem Umfange des horizontalen Querschnitts dieser Wand proportional setzen, und ein Gleiches läßt sich auch von P′ annehmen. Ist nun c der Umfang des genannten Querschnitts, so kann man $P = pc$ und $P' = p'c$ setzen, wobei p und p′ Factoren sind, von welchen ersterer von der Anziehung der Materie des Rohrs auf die Flüssigkeit, und letzterer von derjenigen der Flüssigkeitstheilchen gegen einander abhängen. Nennen wir ferner den Flächeninhalt des Querschnitts a, die Höhe, welche die Säule AEFB haben würde, wenn sie ohne Aenderung ihrer Masse eine ebene Oberfläche bei AB hätte, h, und das specifische Gewicht des Wassers s, so ist $Q = ahs$, und wir haben statt der Gleichung $2P - P' = Q$ jetzt $(2p - p')c = ahs$ und $h = \frac{2p - p'}{s} \cdot \frac{c}{a}$. Dieser Ausdruck paßt offenbar auch für

Digitized by Google

jeden anderen tropfbaren Körper außer Waſſer, wenn unter s das ſpecifiſche Gewicht des erſteren verſtanden wird.

§. 537. Man ſieht aus der für h gefundenen Formel, daß dieſelbe nur dann einen poſitiven Werth erhält, alſo wirklich ein Aufſteigen der Flüſſigkeit über ihre Oberfläche außerhalb des Rohres ſtattfindet, wenn $2p > p'$ iſt, d. h. wenn die Anziehung der Flüſſigkeitstheilchen unter einander weniger beträgt, als das Doppelte der Anziehung des Rohres gegen dieſe Theilchen. Wäre $2p = p'$, alſo erſtere Anziehung der doppelten letzteren gleich, ſo wäre $h = o$, d. h. die Flüſſigkeit würde ſich ſo verhalten, als ob keine Molecularwirkung vorhanden wäre. Wäre endlich $2p < p'$, d. h. überträfe die Anziehung der Flüſſigkeitstheilchen gegen einander die doppelte Anziehung des Rohrs gegen dieſelben, ſo wäre h negativ, und es ſtände dann die Flüſſigkeit im Haarröhrchen tiefer, als außerhalb deſſelben.

§. 538. Unter übrigens gleichen Umſtänden verhalten ſich die Längen der gehobenen oder hinabgedrückten Säulen in cylindriſchen Haarröhrchen von verſchiedener Bohrung umgekehrt wie ihre Durchmeſſer.

Es ſeien c und c' die Peripherien, a und a' die Flächen, d und d' die Durchmeſſer der zwei Querſchnitte, h und h' die zwei Höhen, ſo iſt $c = \pi d$, $c' = \pi d'$, $a = \frac{1}{4}\pi d^2$ und $a' = \frac{1}{4}\pi d'^2$, alſo $\frac{c}{a} = \frac{\pi d}{\frac{1}{4}\pi d^2} = \frac{4}{d}$ und ebenſo $\frac{c'}{a'} = \frac{4}{d'}$. Nach §. 536 iſt alſo $h = \frac{2p - p'}{s} \cdot \frac{4}{d}$ und $h' = \frac{2p - p'}{s} \cdot \frac{4}{d'}$, alſo $h : h' = \frac{2p - p'}{s} \cdot \frac{4}{d} : \frac{2p - p'}{s} \cdot \frac{4}{d'} = \frac{4}{d} : \frac{4}{d'} = \frac{1}{d} : \frac{1}{d'} = d' : d$.

Es geht dies Geſetz auch ſchon ganz einfach aus folgender Betrachtung hervor. Offenbar hebt jeder Punkt der inneren Wand eines Haarröhrchens gleich viel von der Flüſſigkeit. Je größer alſo der Durchmeſſer und daher auch der Umkreis der inneren Röhre iſt, deſto mehr Theile ſind da, um die Flüſſigkeit emporzuheben. Es wird demnach in dem weiteren Haarröhrchen wirklich eine größere Flüſſigkeitsmaſſe gehoben, dieſe füllt aber keine ſo große Höhe an, weil der Querſchnitt wie das Quadrat des Durchmeſſers wächſt. Iſt der eine Durchmeſſer nmal größer, als der andere, ſo werden nmal ſo viele Flüſſigkeitstheilchen gehoben, aber da das Röhrchen bei gleicher Höhe n^2 mal ſo viele aufnehmen kann, ſo wird nur $\frac{1}{n}$ der Höhe erfüllt, als in dem engeren Röhrchen, deſſen Durchmeſſer nmal kleiner iſt.

Die Durchmeſſer ſolcher Röhrchen kann man ſehr ſcharf dadurch beſtimmen, daß man ſie leer abwägt, hierauf eine beliebig lange Queckſilberſäule hineinbringt, wieder ihr Gewicht beſtimmt, und ſo aus der Differenz beider Reſultate das Gewicht der hineingebrachten Queckſilberſäule findet. Hat die Säule die Länge l, und iſt s das ſpecifiſche Gewicht des Queckſilbers, ſo iſt das Gewicht der Queckſilberſäule $p = \frac{1}{4}\pi d^2 ls$, woraus $d = 2\sqrt{\frac{p}{\pi ls}}$ gefunden wird.

Digitized by Google

§. 539. Die Höhe der zwischen 2 parallelen Platten gehobenen oder hinabgedrückten Flüssigkeitssäule ist halb so groß, als diejenige, welche ein cylindrisches Röhrchen von demselben Material, dessen Dicke dem Abstande der Platten gleichkommt, darbietet.

Es sei der Querschnitt eines prismatischen Röhrchens ein Rechteck und zwar b die Breite, d die Dicke des Rohrs, so ist $c = 2(b+d)$ und $a = bd$, also $\frac{c}{a} = \frac{2(b+d)}{bd} = 2\left(\frac{1}{d}+\frac{1}{b}\right)$, also h nach §. 536 $= \frac{2p-p'}{s}$. $2\left(\frac{1}{d}+\frac{1}{b}\right)$. Setzt man an die Stelle eines solchen Rohres 2 ebene, einander parallele Platten, deren Abstand $= d$ ist, so erscheint in dem eben gefundenen Ausdruck b in Bezug auf d unendlich groß, also $\frac{1}{b}$ gegen $\frac{1}{d}$ unendlich klein, und es kann daher ersterer Bruch vernachlässigt werden. Es wird daher $h = \frac{2p-p'}{s} \cdot \frac{2}{d}$, für ein cylindrisches Rohr von dem Durchmesser d ist aber nach §. 538 $h' = \frac{2p-p'}{s} \cdot \frac{4}{d}$, folglich $h : h' = \frac{2}{d} : \frac{4}{d} = 2 : 4 = 1 : 2$.

§. 540. Berühren sich die Platten an einer Kante, und stellt man sie so in die Flüssigkeit, daß diese gemeinschaftliche Kante senkrecht gegen den Horizont steht, so bildet die Grenzlinie der Flüssigkeit zwischen den beiden gegen einander geneigten Platten einen Hyperbelast.

Fig. 163.

Die von der Kante aus immer größer werdenden Entfernungen der beiden Platten von einander bilden gleichsam ein System von Haarröhrchen und nach §. 539 und 538 muß die Flüssigkeit an verschiedenen Stellen eine ihrem gegenseitigen Abstande an diesen Stellen umgekehrt proportionale Höhe erreichen. Es sei (Fig. 163) d die Entfernung der Platten, y die Höhe der Flüssigkeit bei α, d' die Entfernung der Platten, und y' die Höhe der Flüssigkeit bei β, so ist $d : d' = y' : y$. Die Entfernungen der Platten bei α und β sind aber offenbar proportional den Entfernungen der Punkte α und β von der gemeinschaftlichen Kante, folglich $d : d' = \gamma\alpha : \gamma\beta$. Setzen wir $\gamma\alpha = x$ und $\gamma\beta = x'$, so haben wir $x : x' = y' : y$. Nun kann man y und y' als Ordinaten, und x und x' als die dazu gehörigen Abscissen der Curve, welche die Flüssigkeit bildet, ansehen, wenn man γ zum Anfangspunkt der Coordinaten nimmt. Da sich nur bei der Hyperbel, wenn die Asymptoten die Coordinatenaxen sind, die Ordinaten umgekehrt wie die zugehörigen Abscissen verhalten, so bildet demnach die Flüssigkeit eine Hyperbel.

Digitized by Google

Viertes Kapitel.

Hydrodynamik oder Hydraulik.

§. 541. Daß tropfbare Flüssigkeiten den bewegenden Kräften folgen, und daß, wenn einmal eine Bewegung bestimmter Art hervorgebracht ist, diese nach den allgemeinen Bewegungsgesetzen erfolgen müsse, ist für sich klar, und insofern wäre über die Bewegung solcher Flüssigkeiten Nichts weiter zu sagen. Allein die Verschiebbarkeit der Theile und die dadurch begründete Fortpflanzung eines einseitigen Druckes nach allen Richtungen (§. 510) macht, daß bei Flüssigkeiten Bewegungen geschehen in Fällen, wo bei festen Körpern Gleichgewicht wäre, und daß überhaupt Bewegungen im Innern der Flüssigkeiten entstehen, welche von der Bewegung der ganzen Masse verschieden sind. Diese inneren Bewegungen erschweren die Theorie der Bewegung tropfbarer Körper ungemein, und ließen sie bis jetzt nicht zu jener Vollkommenheit gelangen, welcher sich die Theorie der Bewegung fester Körper erfreut. Es müssen hier zweierlei von der Schwere der Theile flüssiger Körper abhängige Bewegungen unterschieden werden, nämlich fortschreitende Bewegungen und s. g. Wellenbewegungen. Hier können dieselben jedoch nur insoweit abgehandelt werden, als zu ihrem Verständniß die Kenntniß der Elementarmathematik ausreicht.

A. Fortschreitende Bewegung.

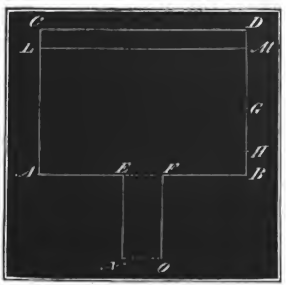


Fig. 161.

§. 542. Es ABDC (Fig. 164) ein überall gleich weites, bis CD mit Wasser gefülltes Gefäß. Sobald EF oder GH geöffnet wird, muß Wasser herausfließen und diesem wieder neues nachfolgen. Dadurch muß natürlich auch die Oberfläche sinken, und überhaupt eine Bewegung in der ganzen Masse entstehen. Wenn das vorhergehende Wasser so schnell ausweicht, als das darüber stehende folgen will, so erfolgt gar kein Druck der Wassermassen auf einander, und Alles geht so wie bei dem freien Fall vor sich. Fließt aber das vorausgehende Wasser nicht so schnell, als das folgende fließen will, so drückt diese Masse auf jene, es entsteht dadurch auch ein Gegendruck, und, weil die Theile auszuweichen suchen, auch ein Druck auf die Seitenwände. Daher werden die der Ausflußöffnung zunächst liegenden Theilchen durch ihre Schwere und durch den Druck der darüber stehenden Säule beschleunigt, und der Ausfluß erfolgt schneller, als bei dem freien Fall. Jene darüber stehende Säule drückt aber nicht mit ihrem ganzen Gewicht, weil sie selbst im Sinken begriffen ist, sondern natürlich desto weniger, je mehr sich ihre Geschwindigkeit der von der Schwere allein bedingten nähert. Man nennt diesen Druck den hydrodynamischen Druck zum Unterschiede von dem hydrostatischen, welchen ruhende Flüssigkeiten ausüben.

Digitized by Google

§. 543. Die Oberfläche der Flüssigkeit bleibt, wenn die Oeffnung gegen die Weite des Gefäßes sehr klein ist, selbst während des Sinkens immer horizontal, nur in der Nähe des Bodens fängt das Wasser an, eine trichterförmige Vertiefung zu bekommen. Diese rührt aber von einer Seitenbewegung der Theile der Flüssigkeit in der Nähe der Oeffnung her; denn wenn man kleine Stücke Bernstein in das Wasser thut, so bemerkt man, daß sie Anfangs in verticaler Richtung sinken, in der Nähe der Oeffnung aber in eine krummlinige Bewegung gegen dieselbe einlenken, und mit einander convergiren, die Oeffnung mag an dem Boden oder an der Seitenwand angebracht sein.

§. 544. Die Geschwindigkeit, mit welcher das Wasser in einem prismatischen Gefäße an der Oberfläche sinkt, muß sich zu derjenigen, mit welcher es durch eine Oeffnung fließt, verhalten wie der Querschnitt der Oeffnung zu der Größe der Oberfläche.

Denn wenn das Wasser in einer Zeiteinheit von CD (Fig. 164) nach LM gekommen ist, so muß das Volumen CLMD dem Volumen des durch die Oeffnung EF in derselben Zeit fließenden Wassers ENOF gleich sein, d. h. CL × CD muß = EF × EN sein, oder es muß sich verhalten CL : EN = EF : CD, wo CL und EN die Geschwindigkeiten bedeuten. Kennt man die Querschnitte EF und CD, so läßt sich aus der Geschwindigkeit in CD auf diejenige in EF ein Schluß machen. Dieses gewährt bei Versuchen einen großen Vortheil, indem sich der Raum, welchen das Wasser in CD zurücklegt, leichter beobachten läßt, als in EF.

§. 545. Die Ausflußgeschwindigkeit ist grade so groß, wie die Geschwindigkeit, welche ein frei fallender Körper erlangen würde, wenn er von dem Spiegel der Flüssigkeit bis zu der Ausflußöffnung herabfiele.

Fig. 165.

Wenn die Flüssigkeitsschicht abcd (Fig. 165), welche sich unmittelbar über der Oeffnung ab befindet, frei herabfiele, ohne durch die über ihr lastende Flüssigkeit beschleunigt zu sein, so würde sie die Oeffnung mit derjenigen Geschwindigkeit verlassen, welche der Höhe ac entspricht, die wir mit h bezeichnen wollen. Diese Geschwindigkeit ist nach §. 441 $c = \sqrt{2gh}$. Nun aber ist die ausströmende Schicht nicht bloß durch ihre eigene Schwere beschleunigt, sondern durch die Schwere der ganzen auf ihr lastenden Flüssigkeit. Die beschleunigende Kraft der Schwere g verhält sich also zu der beschleunigenden Kraft g', welche die flüssigen Theilchen wirklich austreibt, wie ac : af, oder wie h : s, wenn die Druckhöhe mit s bezeichnet wird, d. h. es ist $g : g' = h : s$, und also ist die auf die ausfließende flüssige Schicht wirkende beschleunigende Kraft $g' = \frac{gs}{h}$. Wenn aber die beschleunigende Kraft, welche auf die ausfließende Schicht wirkt, nicht g, sondern g' ist, so ist auch die Ausflußgeschwindigkeit $c' = \sqrt{2g'h}$, und wenn wir in diesem Werthe von c' den eben gefundenen Werth von g' setzen, so erhalten wir für die Aus-

Digitized by Google

flußgeschwindigkeit den Werth $c' = \sqrt{2 \cdot \frac{gs}{h} \cdot h} = \sqrt{2gs}$. Dies ist aber dieselbe Geschwindigkeit, welche ein Körper erlangt, wenn er eine Höhe s frei durchfällt.

Dieser Satz heißt nach seinem Erfinder Toricelli's Theorem, da ihn Toricelli, wenn gleich nur als Erfahrungssatz und ohne noch einen Beweis davon geben zu können, zuerst veröffentlichte. Zu bemerken ist noch, daß die Oeffnungen in ganz dünne Metallblättchen gemacht sein müssen; denn wenn die Oeffnungen sich in einer dicken Wand befänden, so würde die Ausflußgeschwindigkeit zu sehr durch die Reibung an den Wänden der Oeffnung vermindert werden. Wie man leicht sieht, ist die gefundene Geschwindigkeit nur die Geschwindigkeit des Wassers in dem Augenblicke, in welchem dasselbe durch die Oeffnung fließt. Auch ist diese Geschwindigkeit selbst in dem Augenblicke des Durchfließens durch die Oeffnung nur unter der Bedingung constant, daß der Druck derselbe bleibe, daß also die Wasserhöhe in dem Gefäße sich nicht ändere. Um bei Versuchen eine constante Druckhöhe, und dadurch auch eine gleichbleibende Geschwindigkeit des ausfließenden Wassers zu erzielen, sind verschiedene Apparate angegeben worden, wie die Mariotte'sche Flasche, der Schwimmer von Prony u. a.

§. 546. Die Ausflußgeschwindigkeit hängt nur von der Tiefe der Oeffnung unter dem Niveau, aber nicht von der Natur der Flüssigkeit ab.

Es folgt dies unmittelbar aus dem vorhergehenden Paragraphen, da der Werth für die Ausflußgeschwindigkeit ganz unabhängig von der materiellen Beschaffenheit gefunden wurde. Bei gleichen Druckhöhen muß also Wasser und Quecksilber gleich schnell ausfließen. Jede Quecksilberschicht wird zwar durch einen Druck ausgetrieben, welcher 13,55 mal so groß ist, als bei dem Wasser, dagegen ist aber auch die Masse eines Quecksilbertheilchens, welches ausfließt, 13,55 mal größer, als die eines gleich großen Wassertheilchens.

§. 547. Die Ausflußgeschwindigkeiten verhalten sich wie die Quadratwurzeln der Druckhöhen.

Die verschiedenen Druckhöhen seien H und h, die dazu gehörigen Ausflußgeschwindigkeiten C und c, so ist nach §. 545 $C = \sqrt{2gH}$ und $c = \sqrt{2gh}$, also $C : c = \sqrt{2gH} : \sqrt{2gh} = \sqrt{H} : \sqrt{h}$.

§. 548. Weil die Geschwindigkeit des ausfließenden Wassers von der Druckhöhe abhängt, so sieht man ein, daß bei Seitenöffnungen, wo jeder horizontale Streifen eine andere Wasserhöhe hat, die Geschwindigkeiten in der Oeffnung verschieden sein müssen. Denkt man sich nun unter allen diesen Geschwindigkeiten eine solche, bei welcher eben so viel Wasser ausflösse, wie bei den verschiedenen, so heißt diese die mittlere Geschwindigkeit, und diejenige Wasserhöhe, welche dieser mittleren Geschwindigkeit zugehört, die Druckhöhe der Seitenöffnung. Wenn die lothrechte Höhe einer Seitenöffnung in Bezug auf die lothrechte Entfernung des Wasserspiegels von dieser Oeffnung nur klein ist, so können auch die Geschwindigkeiten in der Oeffnung nicht sehr von einander abweichen, und man nimmt in solchen Fällen die Entfernung des Schwerpunkts der Oeffnung von dem Wasserspiegel als Druckhöhe an.

Digitized by Google

§. 549. Wie müssen conische Gefäße beschaffen sein, wenn in denselben beim Ausflusse der Wasserspiegel mit constanter Geschwindigkeit sinken soll?

D und d seien die Durchmesser der der Druckhöhe H und h entsprechenden Querschnitte des Gefäßes, dann sind die Querschnitte selbst $\frac{1}{4}\pi D^2$ und $\frac{1}{4}\pi d^2$. Soll nun aber die Bedingung der Aufgabe erfüllt werden, so müssen nothwendig die Querschnitte des Gefäßes nach dem Verhältniß der Ausflußgeschwindigkeiten abnehmen. Dieses Verhältniß ist nach §. 547 $\sqrt{H}:\sqrt{h}$, folglich muß $\frac{1}{4}\pi D^2:\frac{1}{4}\pi d^2 = \sqrt{H}:\sqrt{h}$ sein, oder $D^2:d^2 = \sqrt{H}:\sqrt{h}$, oder $D:d = \sqrt[4]{H}:\sqrt[4]{h}$, d. h. die Durchmesser der Querschnitte müssen sich verhalten wie die vierten Wurzeln aus den Druckhöhen.

Hierauf gründet sich die Form der Gefäße zu Wasser- und zu Sanduhren.

§. 550. Springt ein Wasserstrahl aus einer horizontalen Oeffnung vertical in die Höhe, so erreicht er eine Höhe, welche der Druckhöhe gleich ist.

Man kann jedes Theilchen eines solchen Strahls ansehen als einen vertical aufwärts geworfenen Körper, dessen Anfangsgeschwindigkeit v gleich ist derjenigen Geschwindigkeit, mit welcher er die Oeffnung verläßt. Nun ist v nach §. 545 $= \sqrt{2gs}$. Er steigt aber nach §. 445 zu einer Höhe $= \frac{v^2}{2g}$. Aus $v = \sqrt{2gs}$ folgt $v^2 = 2gs$ und daraus $\frac{v^2}{2g} = s =$ der Druckhöhe.

Durch die Versuche findet man, daß der aufsteigende Wasserstrahl bei Weitem nicht die Höhe erreicht, welche er nach diesem Paragraphen erreichen müßte. Es sind daran nur Hindernisse der Bewegung Schuld. Den wesentlichsten Einfluß übt das von dem Gipfel wieder herabfallende Wasser aus, indem es das freie Aufsteigen des nachfolgenden Wassers verhindert. Deßhalb steigt auch der Strahl augenblicklich höher, sobald man die Ausflußöffnung so wendet, daß der ausfließende Strahl einen ganz kleinen Winkel mit der Verticalen macht, daß also das Wasser neben dem aufsteigenden Strahle herabfällt. Auch dadurch wird die Höhe vorzüglich vermindert, daß die vorangehenden Theile immer langsamer werden, da jeder Tropfen mit gleichförmig verzögerter Bewegung steigt, was dann für die nachfolgenden Theile zu einem steten Hinderniß wird. Andere Hindernisse sind noch die unvermeidliche Reibung an den Wänden, und der Widerstand der Luft.

§. 551. Es soll die Wassermenge, welche aus einer Oeffnung in einer gegebenen Zeit hervorspringt, bestimmt werden.

Diese Wassermenge hängt offenbar von der Größe der Oeffnung und von der Ausflußgeschwindigkeit ab. Wenn alle Wassertheilchen die Oeffnung mit derjenigen Geschwindigkeit passirten, welche der Druckhöhe entspricht (§. 545), so würde die in einer Secunde ausfließende Wassermenge eine prismatische Säule bilden, deren Basis gleich der Oeffnung, und deren Höhe gleich dem Wege ist, welchen ein Wassertheilchen vermöge seiner Geschwindigkeit in einer Secunde zurücklegt. Dieser Weg ist aber die Ausflußgeschwindigkeit selbst, also nach §. 545 $= \sqrt{2gs}$, und wenn wir dem-

Digitized by Google

nach den Flächeninhalt der Oeffnung mit f bezeichnen, so ist die Ausflußmenge in einer Secunde $= f.\sqrt{2gs}$.

Die Versuche geben ein ziemlich abweichendes Resultat, man erhält eine viel geringere Menge. Daher nennt man auch die eben gefundene Ausflußmenge die theoretische. Die Differenz zwischen der theoretischen und beobachteten Ausflußmenge beweist unwiderleglich, daß nicht alle Wassertheilchen die Oeffnung mit derjenigen Geschwindigkeit passiren, welche der Druckhöhe entspricht. In der That haben im Querschnitte der Oeffnung nur die in der Mitte sich befindenden Wasserfäden diese Geschwindigkeit, während sie für die mehr nach dem Rande der Oeffnung hin ausfließenden geringer ist, wie dies auch nothwendig nach der folgenden Betrachtung sein muß. In einem weiten Gefäß mit enger Oeffnung kann die ganze flüssige Masse mit Ausnahme der in der Nähe der Oeffnung befindlichen Theile als ruhend betrachtet werden. Die nach einander ausströmenden Schichten beginnen also ihre Bewegung nicht zu gleicher Zeit, die vordersten haben bereits das Maximum der Geschwindigkeit erreicht, während die hintersten erst ihre Bewegung beginnen. Es würde dies ein Zerreißen der auf einander folgenden Schichten zur Folge haben, wenn sich leere Räume bilden könnten. Weil dies aber nicht möglich ist, so ziehen sich die einzelnen Schichten mehr in die Länge, während ihr Durchmesser abnimmt. In dem Maße aber, in welchem der Querschnitt dieser Schichten sich vermindert, müssen andere Wassertheilchen von den Seiten zufließen. Da diese aber ihre Bewegung rechtwinklig gegen die Oeffnung erst später beginnen, so ist klar, daß sie mit einer geringeren Geschwindigkeit in der Oeffnung selbst ankommen, als die centralen Wasserfäden. Während also der Kern des ausfließenden Strahles in dem Momente, in welchem er die Oeffnung verläßt, die der Druckhöhe entsprechende Geschwindigkeit hat, ist er von Wasserfäden umgeben, deren Geschwindigkeit um so geringer ist, je näher sie dem Rande der Oeffnung sind, und daraus folgt denn, daß die Ausflußmenge geringer sein muß, als wenn alle Theilchen die Oeffnung mit der Geschwindigkeit des Kernstrahles verließen. Die wahre Ausflußmenge beträgt ungefähr 64% der theoretischen. Die Differenz nimmt aber noch etwas zu, wenn die Druckhöhe wächst.

Gleich nachdem der flüssige Strahl die Oeffnung verlassen hat, beobachtet man eine auffallende Veränderung desselben. Er zieht sich nämlich rasch zusammen. In einer Entfernung von der Oeffnung, welche dem Durchmesser der Oeffnung gleich ist, beträgt der Flächeninhalt des Querschnitts nur noch $\frac{2}{3}$ von dem Flächeninhalt der Oeffnung selbst, so daß also an dieser Stelle der Durchmesser des Strahles ungefähr 0,8 von dem Durchmesser der Oeffnung ist. Auch diese Erscheinung, welche man die contractio venae (die Zusammenziehung des Strahles) nennt, hat offenbar ihren Grund darin, daß nicht bloß das vertical über der Oeffnung stehende Wasser ausfließt, sondern daß sich auch das seitwärts befindliche zum Ausflusse hindrängt, und daher in schiefer Richtung herabsteigt.

Denjenigen Factor, mit welchem man die theoretische Ausflußgeschwindigkeit multipliciren muß, um mittelst derselben die wirkliche Ausflußmenge zu bestimmen, nennt man den Contractionscoëfficient, und bezeichnet ihn gewöhnlich mit φ.

§. 552. Auf die Ausflußmenge üben aber auch kleine Ansatzröhren

Digitized by Google

einen nicht unbedeutenden Einfluß. Die Erfahrung lehrt darüber Folgendes: 1) Wenn eine Ansatzröhre genau die Gestalt des freien Strahles von der Oeffnung bis zu der Stelle, wo die Contraction aufhört, und auch grade die Länge von der Oeffnung bis zu dieser Stelle hat, so übt sie gar keinen Einfluß auf die Ausflußmenge aus. 2) Durch cylindrische Ansatzröhren fließt der Strahl entweder frei durch, wie durch eine Oeffnung von gleichem Durchmesser, und in diesem Falle übt die Röhre ebenfalls keinen Einfluß aus; oder das Wasser adhärirt an den Wänden der Röhre, so daß die Flüssigkeit die ganze Röhre ausfüllt, und ein Strahl von dem Durchmesser der Röhre ausfließt. In dem letzteren Falle veranlaßt die Ansatzröhre eine Vermehrung der Ausflußmenge. Während eine Oeffnung in dünner Wand 64% der theoretischen Ausflußmenge gibt (§. 551), erhält man durch eine solche cylindrische Ansatzröhre 84%, vorausgesetzt, daß die Länge der Röhre ihrem vierfachen Durchmesser gleich ist. Bei geringer Druckhöhe ist der Strahl stets anhängend, bei großer Druckhöhe hingegen ist er frei. 3) Ein sich nach Außen erweiterndes conisches Ansatzrohr wirkt, im Falle es voll ausfließt, wie ein cylindrisches, nur bewirkt es eine noch größere Vermehrung der Ausflußmenge.

§. 553. Die Ausflußgeschwindigkeit wird durch cylindrische oder conische Ansatzröhren in demselben Verhältniß vermindert, in welchem die Ausflußmenge vermehrt wird.

Die Adhäsion des Wassers an die Röhrenwände ist keine beschleunigende Kraft, und kann daher auch die Quantität der Bewegung nicht vermehren. Bezeichnen wir nun mit M die Ausflußmenge durch eine Oeffnung in dünner Wand, und durch v die entsprechende Geschwindigkeit, so stellt das Produkt Mv die Bewegungsquantität dar. Wenn nun die Ausflußmenge M vermehrt, wenn sie zu M' wird, so muß demnach die entsprechende Ausflußgeschwindigkeit v' so viel kleiner sein, daß $Mv = M'v'$ sein kann; denn wenn dies nicht der Fall wäre, so müßte eine Veränderung in der Bewegungsquantität vorgegangen sein.

§. 554. Der Grund, warum Ansatzröhren die Ausflußmenge vermehren, und die Ausflußgeschwindigkeit vermindern, ist folgender. Indem das Wasser in das Ansatzrohr einströmt, erleidet es eine Contraction, wie wenn es aus einer Oeffnung in dünner Wand ausflösse. Es geht dies daraus hervor, daß, wenn man dem Ansatzrohr die Gestalt des contrahirten Strahles gibt (Fig. 166), der Ausfluß vollkommen so stattfindet, als ob das Ansatzrohr ganz cylindrisch wäre. Weiterhin aber, sobald einmal die Röhrenwände benetzt sind, bewirkt die Adhäsion an die Röhrenwände, daß sich die Ansatzröhre vollständig ausfüllt, und somit ist der Querschnitt des Strales durch das Ansatzrohr vergrößert, er ist bei dem Austritt aus dem Rohr größer, als an der Stelle der Contraction. Wenn nun die Wassertheilchen, den ganzen Querschnitt der Röhre ausfüllend, dieselbe mit derjenigen Geschwindigkeit verließen, mit welcher sie die Stelle der größten Contraction passiren, so müßte nothwendig ein Zerreißen der auf einander folgenden Wasserschichten eintreten. Die Trennung der Wassertheilchen, also die Bildung von leeren Räumen, wird aber durch den Druck der Luft verhindert, welcher den Einfluß der Wassertheilchen in das Rohr beschleunigt,

Fig. 166.

Digitized by Google

dagegen aber auch den Ausfluß aus demselben verzögert. Durch den Druck der Luft werden die ausfließenden Wassertheilchen so viel zurückgehalten, daß dadurch ein voller Ausfluß möglich wird. Daher kommt es auch, daß, wenn in einer Seitenöffnung des Ansatzrohres ein gebogenes Röhrchen eingesetzt wird, dessen unteres Ende in ein Gefäß mit Wasser mündet, durch das Bestreben des Wassers, in dem Ansatzrohr einen luftleeren Raum zu bilden, das Wasser in dem Röhrchen in die Höhe gesaugt wird.

§. 555. Mit Berücksichtigung von §. 548 und 551 kann die Ausflußmenge aus einer kleinen Seitenöffnung leicht gefunden werden. Sobald der Wasserstrahl die Seitenöffnung verlassen hat, ist die Bewegung desselben mit derjenigen eines schweren, nach einer horizontalen Richtung geworfenen Körpers einerlei; denn der Seitendruck treibt das Wasser horizontal fort, während es die Schwere vertical abwärts zieht. Deßhalb ist die Bahn eines solchen Strahles eine Parabel.

Wenn nun die Ausflußmenge aus größeren Seitenöffnungen gefunden werden soll, so sucht man die größeren Seitenöffnungen auf kleine zurückzuführen. Es geschieht dies im Allgemeinen dadurch, daß man sie durch Horizontallinien in Theile von sehr geringer Höhe, die man als Rechtecke ansehen kann, theilt, dann die Wassermenge für jeden dieser Theile bestimmt, indem man ihn als eine besondere Oeffnung ansieht, und die Resultate addirt. Auf diese Weise wird dann die Wassermenge für die ganze Oeffnung erhalten.

§. 556. Trotz der eben angeführten allgemeinen Methode sollen doch in den folgenden Paragraphen noch einige besondere Fälle näher betrachtet werden.

Die Oeffnung sei ein Rechteck, welches bis zu dem Wasserspiegel reicht, und die Seitenwand bilde mit der Ebene des Wasserspiegels einen gegebenen Winkel, es soll für diesen Fall die Ausflußmenge bestimmt werden.

Fig. 167.

Es sei GH (Fig. 167) die Durchschnittslinie der Wand, in welcher sich die Oeffnung befindet, mit der Ebene des Wasserspiegels, gegen welchen sie um den Winkel β geneigt sei. Die Breite ND = PJ des Rechtecks sei = b, seine Höhe NP = DJ = H, die gesuchte Wassermenge = M, die mittlere Geschwindigkeit = c. Man theile NP in unendlich viele gleiche Theile, wie EF, von welchen jeder = d ist. Wenn ihre Anzahl = n gesetzt wird, so ist H = nd. Durch die Theilungspunkte ziehe man Horizontallinien, wie EB, FC u. s. w., so theilen diese die Oeffnung in n Rechtecke. Die Druckhöhen dieser Rechtecke sind von Oben angerechnet $d \times \sin.\beta$, $2d \times \sin.\beta$, $3d \times \sin.\beta$ u. s. w., also die Ausflußgeschwindigkeiten nach §. 551 $\varphi . \sqrt{2g.1d.\sin.\beta}$, $\varphi . \sqrt{2g.2d.\sin.\beta}$, $\varphi . \sqrt{2g.3d.\sin.\beta}$ u. s. w., folglich die Wassermengen, indem bei allen kleinen Rechtecken der Inhalt = bd ist, $\varphi . bd . \sqrt{2g.1d.\sin.\beta}$, $\varphi . bd . \sqrt{2g.2d.\sin.\beta}$ u. s. w., und daher die Wassermenge, welche durch die ganze Oeffnung geht, $M = \varphi . b . \sqrt{2g.\sin.\beta}\,(d . \sqrt{1d} + d . \sqrt{2d} + d . \sqrt{3d} + \ldots)$.

Digitized by Google

Fig. 168.

Man denke sich nun ein Parabelsegment abc (Fig. 168), dessen Parameter = p ist. Auf der Axe sei von dem Scheitel aus ab = H genommen, ferner sei ae = eg = gi = ... = d, und die Ordinaten ef, gh, il .... bc normal auf ab, so ist ef = $\sqrt{p.1d}$, gh = $\sqrt{p.2d}$, il = $\sqrt{p.3d}$ u. s. w. Die obige Gleichung läßt sich demnach, wenn wir mit $\sqrt{p}$ erst multipliciren, und dann auch dividiren, auch so schreiben M = $\frac{\phi.b.\sqrt{2g.\sin.\beta}}{\sqrt{p.}} \times (d.\sqrt{p.1d} + d.\sqrt{p.2d} + d.\sqrt{p.3d} \times ....)$ oder $M = \frac{\phi.b.\sqrt{2g.\sin.\beta}}{\sqrt{p.}} \times (d.ef + d.gh + d.il + ...)$.

Nun lassen sich aber die unendlich kleinen Flächen aef, eghf, gilh u. s. w. als Rechtecke ansehen, dann sind die Inhalte derselben gleich d.ef, d.gh, d.il u. s. w. folglich d.ef + d.gh. + d.il + ... = dem Inhalte des Parabelsegments abc, also = $\frac{3}{3}$ ab. bc = $\frac{2}{3}$ H.$\sqrt{p.H}$; mithin ist auch $M = \frac{\phi.b.\sqrt{2g\sin.\beta}}{\sqrt{p}} \times \frac{2}{3} H.\sqrt{p.H.} = \frac{2}{3} \phi.b.H.\sqrt{2g.H.\sin.\beta}$.

Ist die Seitenwand vertical, dann ist der Winkel, welchen sie mit dem Wasserspiegel macht, — 90°, folglich sin.β = 1 und M = $\frac{2}{3}$ φ. b. H$\sqrt{2gH}$. Soll für diesen letzteren Fall auch die mittlere Geschwindigkeit c des ausfließenden Wassers, sowie die Druckhöhe, welche dieser mittleren Geschwindigkeit entspricht, bestimmt werden, so ist nach §. 548 und 551 M = b.H.c, folglich ist b.H.c = $\frac{2}{3}$ φ . b.H. $\sqrt{2g.H}$ und c = $\frac{2}{3}$ φ $\sqrt{2g.H}$. Nennt man nun die zu bestimmende Druckhöhe x, so ist c = φ.$\sqrt{2g.x}$, folglich φ.$\sqrt{2g.x}$ = $\frac{2}{3}$ φ. $\sqrt{2gH}$ und daraus x = $\frac{4}{9}$ H. In diesem Falle stimmt also der Ort der mittleren Geschwindigkeit nicht mit dem Mittelpunkte oder Schwerpunkte der Oeffnung überein, sondern liegt etwas höher, vergleiche §. 548.

§. 557. Bisher war angenommen, die Oeffnung sei frei, und das Wasser fließe in die freie Luft aus. Es fragt sich, welchen Einfluß es habe, wenn dagegen die Oeffnung ganz untergetaucht oder überfluthet ist.

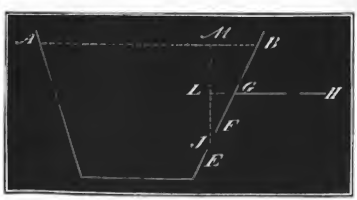


Fig. 169.

Die Oeffnung EF (Fig. 169) sei ganz unter dem Wasserspiegel GH des bereits aus dem Gefäße ausgeflossenen Wassers, J sei irgend ein Wassertheilchen in der Oeffnung. Die Kraft, welche dieses Theilchen zum Ausfließen zu bringen sucht, wird durch die Druckhöhe MJ dargestellt. Dieser Kraft widersteht aber der Gegendruck des bereits ausgeflossenen

Digitized by Google

Waſſers, und der Widerſtand für das Waſſertheilchen J entſpricht der Druckhöhe JL. Die Kraft alſo, welche das Ausfließen wirklich zur Folge hat, iſt gleich der Differenz der beiden genannten Kräfte, und die correſpondirende Druckhöhe iſt alſo = MJ — LJ = ML. Sie hat demnach für alle Punkte der Oeffnung einen gleichen Werth. Hieraus folgt, daß die Geſchwindigkeit in allen Punkten einer ganz untergetauchten Oeffnung die nämliche iſt, und daß die Druckhöhe dem verticalen Abſtand der Ebenen der beiden Waſſerſpiegel gleich iſt. Wenn man demnach dieſen verticalen Abſtand der beiden Waſſerſpiegel mit H, und den Flächeninhalt der Oeffnung mit a bezeichnet, ſo hat man für eine ganz untergetauchte Oeffnung die Gleichungen $c = \phi.\sqrt{2g.H}$ und $M = \phi\, a.\sqrt{2g.H}$.

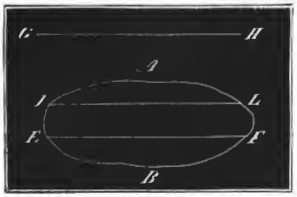


Fig. 170.

§. 558. Wenn die Oeffnung nur zum Theil untergetaucht iſt, nämlich wenn AEBF (Fig. 170) die Oeffnung, und EF der Unterwaſſerſpiegel iſt, ſo zerlegt man die Oeffnung in zwei Theile, einen überflutheten EBF und einen freien EJLF oder EAF, je nachdem der Oberwaſſerſpiegel in JL oder in GH befindlich iſt, alſo die Oeffnung bis zu dem Waſſerſpiegel reicht oder nicht. Man berechnet die Waſſermenge für jeden Theil beſonders, und addirt die Reſultate zuſammen, ſo erhält man die Waſſermenge für die ganze Oeffnung.

§. 559. Bisher haben wir bei unſeren Unterſuchungen immer angenommen, daß der Waſſerſpiegel unveränderlich ſei. Wir gehen nun zu dem Falle über, wenn derſelbe veränderlich iſt. Auch dieſe Unterſuchungen ſind noch lange nicht erſchöpft, und ſelbſt die gewonnenen Reſultate waren großentheils nur durch Anwendung der höheren Mathematik zu erzielen. Wir beſchränken uns daher nur auf einiges Wenige, und nehmen, da bei den in der Ausübung vorkommenden Fällen die Ausflußöffnung im Verhältniß zu dem Querſchnitt des Gefäßes klein, alſo auch der Einfluß der durch das Sinken der Waſſerſchichten bereits erlangten Geſchwindigkeiten auf die Ausflußgeſchwindigkeit gering iſt, bei den folgenden Unterſuchungen an, die Ausflußgeſchwindigkeit ſei in jedem Augenblicke der Quadratwurzel aus der grade ſtattfindenden Druckhöhe proportional (vergl. §. 547).

§. 560. Aus einem Gefäße oder Behälter fließe das Waſſer durch eine Oeffnung, welche ſich in dem Boden oder in einer Seitenwand befindet, in die freie Luft, oder, wenn die Oeffnung untergetaucht iſt, ſo ſei der Unterwaſſerſpiegel unveränderlich.

Digitized by Google

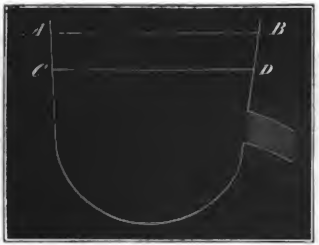


Fig. 171.

Die in der Zeiteinheit zufließende constante Wassermenge sei $= m$. Wenn m auch der in der Zeiteinheit ausfließenden Wassermenge gleich ist, so bleibt der Wasserspiegel unverändert; wenn m kleiner oder größer ist, so sinkt oder steigt er. Wir nehmen im Allgemeinen an, daß er sinke. Es sei AB (Fig. 171) der anfängliche Wasserspiegel, nach Verfluß der Zeit t sei er in CD. Der senkrechte Abstand der beiden Ebenen AB und CD sei $= x$, der Inhalt der Oberfläche CD sei $= Y$, X sei die Wassermenge, welche in der Zeiteinheit ausfließen würde, wenn der Wasserspiegel so lange in CD unverändert stehen bliebe. Während der unendlich kleinen Zeit τ senke er sich von CD an um die unendlich kleine Größe σ. Während der Zeit τ kann er als unveränderlich angesehen werden, und die in derselben ausfließende Wassermenge ist also $X\tau$. Den dadurch leer gewordenen Raum kann man als ein Prisma ansehen, sein Volumen ist also $Y\sigma$; aber nicht nur dieses ist ausgeströmt, sondern auch das in der Zeit τ zugeflossene Wasserquantum $m\tau$. Man erhält demnach die Gleichung $X\tau = Y\sigma + m\tau$ und $\tau = \frac{Y}{X - m} \times \sigma$. Da nun aber nicht die Zeit τ, sondern die Zeit t gefunden werden soll, so müßte man bei Anwendung dieser Gleichung die Senkung x in unendlich viele gleiche Theile zerlegen, von welchen jeder $= \sigma$ wäre, man müßte dann die Werthe bestimmen, welche die Größen X und Y nach und nach annähmen, wenn x der Ordnung nach $= 0\sigma, 1\sigma, 2\sigma$ u. s. w. würde, diese Werthe müßte man der Reihe nach in die obige Gleichung substituiren, um die Zeiten zu erhalten, in welchen der Wasserspiegel jedesmal um σ sinkt; diese Zeiten müßte man summiren, um den Werth von t zu erhalten. Durch dieses Verfahren erhält man nur selten einfache Ausdrücke, meistens, selbst in den einfachsten Fällen, gelangt man zu so verwickelten transcendenten Gleichungen, daß sie für die Anwendung ganz unbrauchbar sind. Man thut daher besser, folgendes annähernde Verfahren anzuwenden, welches Resultate von hinlänglicher Genauigkeit liefert. Man mache nämlich σ nicht unendlich klein, sondern lege ihm einen endlichen kleinen Werth bei, und beobachte das oben angegebene Verfahren. Dadurch verwandelt sich die Summirung einer unendlichen Reihe in die Summirung einer endlichen Anzahl von Gliedern.

§. 561. Wenn ein Wasserzufluß stattfindet, so wird das Gefäß niemals leer, indem der Wasserspiegel nicht tiefer, als bis zu demjenigen Stande sinken kann, der sich vermittelst der Gleichung $X = m$ berechnen läßt. Bei dem Steigen kann der Wasserspiegel eine gewisse Grenze ebenfalls nicht überschreiten, welche sich aus der nämlichen Gleichung ergibt. Wenn sich der Wasserspiegel beim Sinken oder Steigen der erwähnten Grenze nähert, so wird $X - m$ am Ende unendlich klein, und der Werth dieser Größe tritt **mit dem unendlich kleinen Werthe von σ in ein endliches Verhältniß, also**

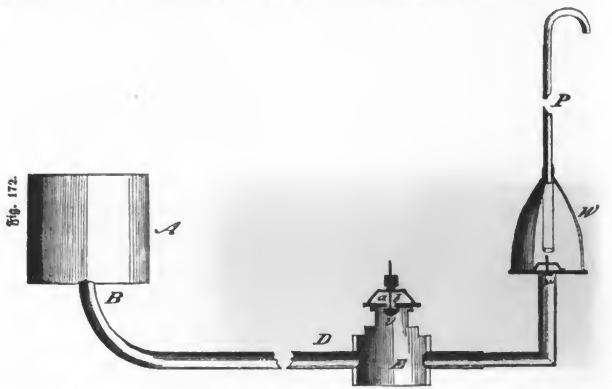
Digitized by Google

erhält dann τ, wegen $\tau = \frac{Y}{X - m} \times \sigma$, einen endlichen Werth, der übrigens durch die Formel nicht richtig angegeben wird, weil in diesen Grenzen die Voraussetzung, auf welcher sie beruht, nicht mehr stattfindet. Die Summe dieser unendlich vielen endlichen Werthe von τ gibt einen unendlich großen Werth für t; daher ist die Zeit, welche vergeht, bis der Wasserspiegel die genannte Grenze erreicht, und unveränderlich wird, unendlich groß, d. h. er gelangt niemals zu einem unveränderlichen Stande, sondern er fällt oder steigt ohne Ende, und nähert sich einer gewissen Grenze, die er nie erreichen kann. Das Sinken oder Steigen wird aber am Ende so gering, daß es nicht mehr bemerkbar ist, und folglich der Wasserspiegel als unveränderlich angesehen werden kann. Hieraus ist ersichtlich, daß es in der Wirklichkeit eigentlich keinen gleichförmigen Ausfluß und keinen unveränderlichen Wasserspiegel gibt, sondern daß alle Wasserflächen beständig im Fallen oder Steigen begriffen sind.

§. 562. Wenn fließendes Wasser die ganze der Druckhöhe entsprechende Geschwindigkeit hat, so übt es gar keinen Druck auf den Behälter aus; sowie aber seine Geschwindigkeit kleiner wird, als die Druckhöhe verlangt, entsteht ein Druck auf das Gefäß von Innen nach Außen; überschreitet die Geschwindigkeit die der Druckhöhe entsprechende Größe, so werden die Gefäßwände sogar einwärts gedrückt. Mann kann demnach bei einem Gefäße, welches fließendes Wasser enthält, durch Vermindern, Vermehren oder Aufheben der Geschwindigkeit des Ausflusses den Druck auf die Gefäßwände vermehren, vermindern, oder gar der Richtung nach umkehren.

Auf der eben bemerkten Veränderung des Druckes beruht der s. g. Stoßheber oder hydraulische Widder Montgolfier's.

Fig. 172.



Das Wasser tritt aus der Zuleitung A (Fig. 172) durch die horizontale Leitröhre BD in den Kopf E des Widders und dann in den Windkessel W, aus welchem es in die Steigröhre P gelangt. Bei ab ist eine Oeffnung, welche tiefer liegen muß, als das Reservoir, aus welchem der

Digitized by Google

Widder gespeist wird, und die durch das Einfalls- oder Sperrventil v verschlossen werden kann. Der Rücktritt des Wassers aus dem Windkessel wird durch ein zweites Ventil (die Aufsteigeklappe) v' verhindert. Wenn das Sperrventil geschlossen, und das Ganze in Ruhe ist, so steht das Wasser in der Steigröhre auf derselben Höhe wie in der Zuleitung. Wenn das Sperrventil durch eine von Außen her angewandte Gewalt herabgedrückt wird, so fließt das Wasser durch die bei ab entstehende Oeffnung in's Freie aus. Das in der Leitröhre befindliche Wasser erlangt dadurch eine Bewegung von B gegen D hin, nimmt bei dem Sperrventil eine aufsteigende Richtung an, und stößt dasselbe in die Höhe, wodurch die Oeffnung bei ab plötzlich geschlossen und das Ausfließen des Wassers daselbst unterbrochen wird. Die Wassermasse stößt nun in Folge ihres Beharrungsvermögens das Steigventil v' auf, bringt in den Windkessel, comprimirt die in dem oberen Theile befindliche Luft, und wird durch den gedachten Stoß sowohl, als durch den Druck der sich wieder ausdehnenden Luft in das Steigrohr getrieben, was, sowie das Nachfließen des Wassers aus dem Reservoir durch die Zuleitröhre, so lange fortdauert, bis die Bewegung durch das Gewicht der in der Steigröhre befindlichen Wassersäule und die in der Maschine stattfindenden Hindernisse vernichtet ist. Das genannte Gewicht und der Druck der comprimirten Luft fängt nun an, der ganzen Wassermasse eine rückgängige Bewegung mitzutheilen, wodurch das Steigventil bald geschlossen, und dann der Druck gegen das Sperrventil v soweit vermindert wird, daß dieses durch sein eigenes Gewicht und durch den Druck der äußeren Luft herabgedrückt wird, worauf dem Wasser der Durchfluß durch die Oeffnung ab freisteht. Sobald die rückläufige Bewegung aufgehört hat, strömt das Wasser in Folge des Druckes, welcher von dem in der Einfallsröhre und dem Reservoir befindlichen Wasser ausgeht, gegen die Oeffnung ab, und durch diese in das Freie, worauf das Spiel der Maschine von Neuem beginnt.

Es ist versucht worden, eine allgemeine Theorie des hydraulischen Widders aufzustellen, aber es ist noch nicht gelungen, alle Umstände dabei zu berücksichtigen. Er kann gebraucht werden, um Wasser zu heben, und zwar hauptsächlich in solchen Fällen, wenn viel Wasser vorhanden ist, so daß es auf einen bedeutenden Verlust nicht ankommt.

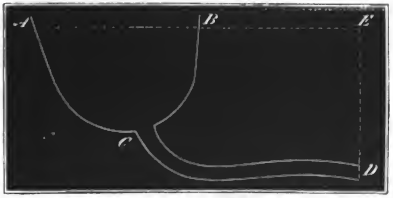


Fig. 173.

§. 563. Wenn das Wasser aus einem Behälter ABC (Fig. 173) sich durch eine Röhre CD ergießt, deren Länge im Verhältniß zu ihrem Durchmesser beträchtlich ist, so würde, wenn kein Widerstand vorhanden wäre, welcher die Bewegung desselben störte, und die ganze Röhre mit Wasser gefüllt wäre, die Ausflußgeschwindigkeit $= \sqrt{2g.DE}$ sein, wenn DE die senkrechte Entfernung des Mittelpunktes der Geschwindigkeit in der Ausflußöffnung von der Ebene des Wasserspiegels im Behälter ABC, oder die senkrechte Entfernung der beiden Wasserspiegel bedeutet, wenn die Röhre in einem zweiten Behälter

Digitized by Google

ausmündet, vergl. §. 545 und 557. Die Erfahrung lehrt aber, daß diese Geschwindigkeit nicht nur durch die Contraction verändert wird, sondern auch daß sie sich von dem obigen Werthe desto mehr entferne, je länger die Röhre ist, daß also noch ein Widerstand vorhanden ist, welcher von der Länge der Röhre abhängt. Dieses ist der Widerstand, welcher von der Anziehung der Röhrenwände gegen die flüssigen Theile herrührt, und im Verein mit der Contraction, den Biegungen der Röhre u. s. w. eine beträchtliche Abweichung der Geschwindigkeit von dem Werthe $\sqrt{2g.DE}$ hervorbringt.

§. 564. Wenn eine Flüssigkeit an einem festen Körper, den sie benetzt, hinfließt, so sucht letzterer die zunächst an seiner Oberfläche befindliche Schicht durch die Adhäsion zurückzuhalten. Diese Schicht sucht durch ihre Cohäsion gegen die nächste flüssige Schicht diese ebenfalls aufzuhalten, und vermindert ihre Geschwindigkeit. Auf dieselbe Weise verkleinert diese zweite Schicht die Geschwindigkeit der dritten, u. s. w. So pflanzt sich die Wirkung der Anziehung des festen Körpers gegen die Flüssigkeit durch die letztere bis zu den entferntesten Schichten fort, und die flüssige Masse wird einen gewissen Theil derjenigen mittleren Geschwindigkeit verlieren, welche sie ohne diesen Widerstand annehmen würde. In einer Röhre nimmt die Geschwindigkeit der Wasserfäden von den Röhrenwänden gegen die Axe hin allmählig zu. Manche Schriftsteller bezeichnen diese Erscheinung als von der Reibung des flüssigen Körpers an der Oberfläche des festen Körpers, an der sie sich hinbewegt, herrührend. Wenn man sich auch dieses Ausdrucks bedienen mag, so darf darunter doch keineswegs eine Reibung wie zwischen zwei festen Körpern verstanden werden, indem nach Versuchen der Widerstand, welchen die Flüssigkeit an der Oberfläche des festen Körpers erleidet, von dem Drucke gegen dieselbe, sowie von der Natur der Wände unabhängig ist. Der Widerstand, welchen die Anziehung der Röhrenwände der Bewegung des Wassers entgegensetzt, und welchen man kurzweg den Widerstand der Wände oder den Röhrenwiderstand zu nennen pflegt, ist desto beträchtlicher, je größer die Fläche ist, in welcher das Wasser die Röhre berührt, denn von desto mehr Punkten muß die Wassermasse in jedem Augenblick losgerissen werden. Daher ist dieser Widerstand dem benetzten Umfange, sowie der Länge der Röhre, mithin dem Produkte beider proportional. Dieser Widerstand verbreitet sich aber auch über die ganze Wassermasse; je größer daher der Querschnitt ist, über desto mehr Wassertheile verbreitet sich derselbe Widerstand, und die Wirkung desselben auf gleiche Theile des Querschnitts oder auf die mittlere Geschwindigkeit wird also dem Inhalte des Querschnitts umgekehrt proportional sein.

§. 565. Dieser Widerstand sucht die Wassertheile zur Ruhe zu bringen, diese müssen also jeden Augenblick gleichsam von Neuem wieder fortgestoßen werden. Die hiezu erforderliche Kraft wird desto beträchtlicher sein, je größer die mitzutheilende Geschwindigkeit ist. Ferner wird dieser Kraftaufwand in gleicher Zeit desto öfter wiederholt werden müssen, je mehr Theile der Flüssigkeit von einem und demselben Punkte der Röhrenwand in gleicher Zeit loszureißen sind. Der Widerstand ist daher dem Quadrate der Geschwindigkeit des Wassers in der Röhre proportional.

Wenn also J und J′ die Inhalte der Querschnitte, p und p′ die benetzten Umfänge, L und L′ die Längen zweier Röhren, v und v′ die mit-

Digitized by Google

leren Geschwindigkeiten des Wassers in denselben, und w und w' die Widerstände bedeuten, dann ist ganz allgemein $w : w' = \frac{Lpv^2}{J} : \frac{L'p'v'^2}{J'}$

§. 566. Wenn, wie bisher, unter Druckhöhe der lothrechte Abstand des Wasserspiegels im Behälter von dem Mittelpunkt der Ausflußöffnung der Röhrenleitung verstanden wird, so kann man sich vorstellen, daß von der ganzen Druckhöhe ein Theil zur Erzeugung der Geschwindigkeit des Wassers in der Röhrenleitung verwandt wird, der übrig bleibende Theil aber als Druck zur Ueberwältigung der Hindernisse der Bewegung oder des Widerstandes in der Röhrenleitung aufgebt. Dieser letztere Druck, welchen die Wände auszuhalten haben, ist jedoch nicht an allen Stellen der Röhre gleich, er ist um so geringer, je mehr man sich der Ausflußöffnung nähert. Wenn die Geschwindigkeit, mit welcher die Flüssigkeit aus der Röhre hervortritt, $\frac{m}{n}$ von derjenigen ist, welche der Druckhöhe entspricht, so haben die Röhrenwände da, wo die Röhre in das Reservoir mündet, einen Druck $= 1 - \frac{m}{n}$ auszuhalten.

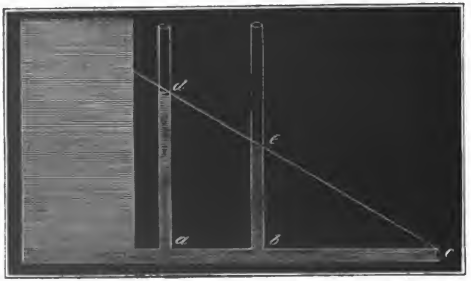


Fig. 174.

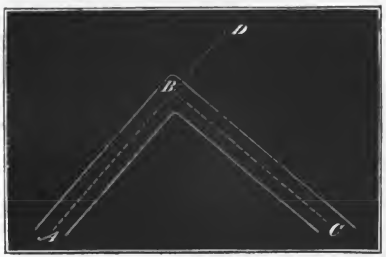
Gesetzt z. B. die Ausflußgeschwindigkeit bei c (Fig. 174) wäre $\frac{2}{3}$ der theoretischen, so ist der Druck, welchen die Seitenwände bei a auszuhalten haben, $\frac{2}{3}$ des Drucks, welcher der Druckhöhe im Reservoir zukommt. Wenn man bei a eine Oeffnung machte, und eine vertical nach Oben gerichtete Röhre einsetzte, so würde in derselben das Wasser bis zu einer Höhe steigen, welche dem Drucke der Röhrenwände an dieser Stelle entspricht; für unser Beispiel würde die Höhe der Wassersäule $ad = \frac{2}{3}$ der Druckhöhe im Reservoir sein. Dieser Druck nun, welchen die Röhrenwände bei a auszuhalten haben, und welcher den Verlust an Bewegung repräsentirt, ist grade nöthig, um die Widerstände in dem ganzen Röhrenstücke von a bis c zu überwinden. Wenn b in der Mitte von a und c liegt, so ist auf dem Wege von b bis c nur noch halb so viel Widerstand zu überwinden, als von a bis c, in b wird deßhalb auch der Druck, welchen die Wände auszuhalten haben, nur noch halb so groß sein, als bei a. In einer bei b angebrachten Röhre wird daher auch das Wasser bis zu einer Höhe $be = \frac{1}{2}$ ad steigen. Wenn man überhaupt an irgend einer Stelle von ac eine solche verticale Röhre einsetzte, so würde das Wasser in derselben so hoch steigen, daß der Gipfel der Wassersäule auf die grade Linie dc fällt.

Digitized by Google

Fig. 175.

§. 567. Wenn ein materieller Punkt, welcher sich mit einer Geschwindigkeit v bewegt, durch einen festen Widerstand in C (Fig. 175.) plötzlich von seiner Richtung AB gegen H abgelenkt wird, so bewegt er sich in der Linie CH mit einer Geschwindigkeit $= v \times \cos.\,HCB$ (vergl. §. 453) und der Unterschied der Geschwindigkeiten, womit er ankommt und weiter geht, ist $= v - v \times \cos.\,HCB = v.\,(1 - \cos.\,HCB) = 2\,v \times \sin.^2 \frac{1}{2} HCB$. Wenn dagegen die Richtungsänderung allmählig vor sich geht, so findet nach demselben Paragraph kein Geschwindigkeitsverlust statt, und der materielle Punkt bewegt sich mit unveränderter Geschwindigkeit weiter.

Fig. 176.



Wenn eine Röhre eine plötzliche Wendung macht, so müßte also jedes Theilchen des in derselben sich bewegenden Wassers einen Verlust an Geschwindigkeit erleiden, welcher $= 2v \times \sin.^2 \frac{1}{2}$ DBC (Fig. 176) wäre, wenn AD und BC die Richtungen der Röhrenaxen sind. Wenn dagegen die Wendung der Röhre allmählig vor sich geht, und jedes Wassertheilchen sich in einer Bahn fortbewegte, welche mit der Röhrenaxe parallel wäre, so würde kein Geschwindigkeitsverlust entstehen. Dieses ist aber in der Wirklichkeit nicht der Fall, sondern bei jeder Wendung treten plötzliche Aenderungen der Geschwindigkeiten ein; also muß ein Theil der vorhandenen Kraft aufgewendet werden, um den daher rührenden Widerstand zu überwinden. Die verschiedenen Bemühungen, welche gemacht worden sind, diesen Kraftaufwand auf theoretischem Wege zu bestimmen, sind weit entfernt, zuverlässige Resultate zu geben, und man thut am besten, ihn aus der Erfahrung abzuleiten.

§. 568. Auch die Temperatur übt einen nicht unbedeutenden Einfluß auf die Bewegung des Wassers in Röhren aus. Die durch die Wärme in der Geschwindigkeit des Wassers hervorgebrachten Aenderungen sind nach den Versuchen Gerstner's bei engen Röhren und kleinen Geschwindigkeiten größer, als bei weiten Röhren und großen Geschwindigkeiten. Der Einfluß der Wärme ist in der Nähe des Gefrierpunktes am beträchtlichsten. Er steht nicht im Verhältniß mit der Aenderung der Wärme, sondern er hat sein maximum, welches von der Geschwindigkeit des Wassers und dem Durchmesser der Röhre abhängt.

B. Wellenbewegung.

§. 569. Die kreisförmigen Wellen, welche im Wasser und anderen tropfbaren Flüssigkeiten durch den Wind, durch Stoß, durch das Hineinfallen fester Körper, durch Herausheben eines Theils derselben u. s. w. erregt werden, bestehen aus abwechselnden Erhabenheiten über und Vertiefungen unter der

Digitized by Google

ruhenden horizontalen Oberfläche. Jene heißen Wellenberge, diese Wellenthäler. Denkt man sich einen senkrechten Durchschnitt, so ist die Durchschnittslinie der senkrechten Ebene mit dem Wellenberge conver, mit dem Wellenthale concav gekrümmt, nach Oben hin bezogen. Die von diesen Bögen begrenzten Stücke der Durchschnittslinie dieser senkrechten Ebene mit der ruhenden horizontalen Oberfläche heißen die Breiten des Wellenberges und des Wellenthales, sowie die Perpendikel aus dem höchsten und tiefsten Punkte auf sie ihre Höhen, welche jeden Berg und jedes Thal in den Vorder- und Hintertheil theilen, von welchen jenes immer auf derjenigen Seite liegt, wohin die Wellenbewegung geht. Die Höhe der Welle ist die Summe aus den Höhen des Berges und des Thales, sowie die Breite oder Länge der Welle die Summe aus den Breiten ihrer beiden Theile.

Zur näheren Untersuchung der Wellenbewegung construirten die Gebrüder Weber, denen wir die meisten Aufschlüsse über die Wellenbewegung verdanken, ihre Wellenrinne, ein rechtwinkliges, schmales, aber tiefes und langes Gefäß mit gläsernen Seitenwänden. Dem Wasser kann man Bernsteintheilchen beimischen, weil diese gleiche Dichte mit dem Wasser haben, und darum mit den Wassertheilchen einerlei Bewegung annehmen. Die Gestalt der Wellen kann man durch das Eintauchen einer mit Staub bestreuten Schiefertafel in die bewegte Flüssigkeit sichtbar machen.

§. 570. Wenn das Gleichgewicht einer ruhigen Flüssigkeit an irgend einer Stelle gestört wird, so bilden sich rings um diese Stelle kreisförmige Wellen mit gemeinschaftlichem Mittelpunkte, von welchen die innerste die höchste ist. Aus diesen Wellen entstehen wieder neue noch größere Wellen in einer nach Außen fortschreitenden Bewegung. Die in der Mitte befindliche Flüssigkeit schwingt während der kreisförmigen Fortpflanzung derselben ebenfalls noch mit, und verursacht dadurch fortwährend das Entstehen neuer Wellen, bis endlich auch die letzten und kleinsten von der ruhenden Mitte aus weiter schreiten, ohne daß ihnen andere nachfolgen. Je stärker der Stoß war, welcher diese Bewegung veranlaßte, desto höher und länger sind natürlich auch die Wellen, und desto größer ist ihre Geschwindigkeit; doch hängt die letztere auch von der Tiefe der Flüssigkeit ab. Da der Stoß einer Welle um so weniger wirkt, je größer die Masse ist, auf welche er erfolgt, so müssen die folgenden Wellen um so langsamer werden, in je größeren Kreisen sie schwingen. Wenn aber der Raum, auf welchen eine Welle wirken kann, sich verengt, so müssen die folgenden Wellen schneller werden, und wenn eine Welle zwischen parallelen und engen Wänden fortschreitet, so muß die Geschwindigkeit gleichförmig sein. Bei Wellen, welche in fließendem Wasser erregt werden, fließt der Mittelpunkt mit der dem Wasser eigenen Geschwindigkeit fort ohne Störung der Wellenbewegung; wirft man ein Stück Holz in solches Wasser, so bleibt es stets im Centrum der erregten Welle, und wird dabei stromabwärts getragen.

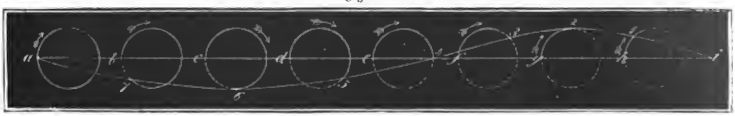
§. 571. Der Stoß, welcher die Wellen veranlaßt, erzeugt auch bis zu einer großen Tiefe Bewegungen in den Flüssigkeitstheilchen. Doch reden wir hier nur von der Bewegung der an der Oberfläche liegenden Theilchen. Ein solches Theilchen beschreibt eine zur Oberfläche senkrechte und in der Richtung der Bewegung liegende Bahn.

Digitized by Google

Fig. 177.

Auf dieser kehrt es entweder wieder an seine vorige Stelle auf dem elliptischen Wege abcd (Fig. 177) zurück, oder es durchläuft nur den Theil mnop einer solchen Bahn. Das Letztere ist dann der Fall, wenn die auf einander folgenden Wellenberge und Wellenthäler nicht gleich gestaltet sind. Was für eine Curve die Bahn der kleinen Flüssigkeitstheilchen eigentlich sei, ist bis jetzt noch gänzlich unbekannt. Selbst an der Oberfläche haben sie keine vollkommen kreisförmige Gestalt, nähern sich aber daselbst derselben dem Augenschein nach sehr. Schon in einer geringen Entfernung unter der Oberfläche der Flüssigkeit nehmen sie eine dem Anblicke nach elliptische Gestalt an, welche desto gestreckter wird, je entfernter von der Oberfläche die Theilchen liegen. Endlich in noch größerer Tiefe fällt die Bahn fast mit einer horizontalen Linie zusammen, so daß man gar keine senkrechte Höhe der Bahn mehr zu unterscheiden im Stande ist.

Fig. 178.

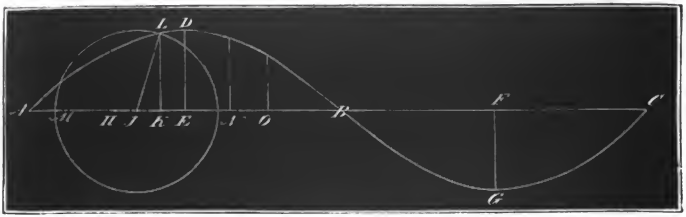


Wenn die kleinen Kreise (Fig. 178) die Bahnen von acht hinter einander liegenden Wassertheilchen a, b, c, d, e, f, g und h auf der Länge ai einer ganzen Welle vorstellen, und das Theilchen a bereits einen ganzen Umfang nach der Richtung des Pfeils durchlaufen hat, so hat b erst ungefähr $^7/_8$ desselben durchlaufen, und befindet sich also in 7. Das Theilchen c hat ungefähr $^6/_8$ seiner Bahn gemacht, und ist darum erst in 6. Ebenso sind d, e, f, g und h bis 5, 4, 3, 2 und 1 gekommen. Die Oberfläche der Welle geht also durch die Punkte a, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 und i. Man sieht hieraus, daß die Höhe der Welle dem verticalen Durchmesser der Bahn jedes Theilchens gleich ist. Bei dieser Bewegung findet also kein eigentliches Fortschreiten der Flüssigkeit statt, wohl aber eine Rotation der Wassertheilchen, bei welcher sie jedoch einander niemals hindern können, indem jedes folgende Theilchen erst etwas später an der Stelle eintrifft, welche das vorhergehende verlassen hat. Auch sieht man daraus, daß jede Welle in derselben Zeit um ihre ganze Länge vorwärts schreitet, in welcher jedes Theilchen einen seiner Umläufe vollendet. Die Wellenbewegung der Oberfläche einer Flüssigkeit ist also nur eine Folge der Bewegung ihrer Theilchen in verticalen Bahnen, und die Figur der Welle nur das Bild jener krummen Linie, welche in einem gewissen Augenblick durch alle die Stellen gezogen wird, in welchen grade jedes oberste Wassertheilchen sich befindet.

Digitized by Google

§. 572. Es soll die Gleichung der Wellenlinie gefunden werden.

Fig. 179.



Es sei AB = b, DE = h (Fig. 179). In einem beliebigen Punkte L der Wellenlinie ziehe man die Ordinate LK = y, zu welcher AK = x als Abscisse gehört, und trage LJ = DE als Hypotenuse des Dreiecks LKJ ein, so ist J der Mittelpunkt des Kreises, in welchem das flüssige Theilchen L schwingt. Statt daß nun eigentlich die auf einander folgenden Wasserttheilchen der Niveaulinie AC successiv angeregt, und in Schwingung versetzt werden, kann man sich die Wellenlinie ADBGC auch durch die Bewegung des Theilchens L auf der Kreisperipherie und Fortbewegung des Mittelpunktes dieses Kreises auf der Linie AC, beide Bewegungen mit constanter Geschwindigkeit, entstanden denken. Ist dann AH = LJ = h, so befindet sich das Theilchen L zuerst in A, und der Mittelpunkt J des Schwingungskreises in H. Da nun das Theilchen L, wenn es die ganze Breite AC der Welle zurückgelegt, also in C ankommt, auch seine ganze Schwingungsbahn um J vollendet hat, so hat es in B die halbe Peripherie durchlaufen, und in D ein Viertel der Peripherie. Bezeichnet man daher mit π die halbe Peripherie, mit φ den Bogen ML, so ist HJ : HE = φ : $\frac{1}{2}\pi$. Es ist aber HJ = AK — JK — AH, AK = x, JK = JL $\times$ cos.LJK = JL $\times$ — cos.MJL = — h $\times$ cos.φ, AH = h, also HJ = x + h $\times$ cos.φ — h. Ferner ist HE = AE — AH = $\frac{1}{2}$ b — h. Werden diese Werthe in obige Proportion eingesetzt, so ist x + h $\times$ cos.φ — h : $\frac{1}{2}$ b — h = φ : $\frac{1}{2}\pi$. Nun ist x + h $\times$ cos.φ — h = x — h + h $\times$ cos.φ = x — h (1 — cos.φ) = x — 2h $\times$ sin.$^2\frac{1}{2}\varphi$, also ist x — 2h $\times$ sin.$^2\frac{1}{2}\varphi$: $\frac{1}{2}$ b — h = φ : $\frac{1}{2}\pi$. Nach der Erfahrung ist h nur etwa = $\frac{1}{40}$ b, folglich ist x — 2h $\times$ sin.$^2\frac{1}{2}\varphi$ ohne merklichen Fehlen = x, und ebenso kann man h gegen $\frac{1}{2}$b vernachlässigen, dann hat man x : $\frac{1}{2}$b = φ : $\frac{1}{2}\pi$, also $\varphi = \frac{x}{b}.\pi$, und sin.$\varphi$ = sin.$\frac{x}{b}\pi$. Ferner ist y = LK = LJ $\times$ sin.LJK = LJ $\times$ sin.MJL = h $\times$ sin.φ, also sin.$\varphi = \frac{y}{h}$ und $\frac{y}{h}$ = sin.$\frac{x}{b}.\pi$ oder $y = h \times \sin.\frac{x}{b}.\pi$.

Aus dieser Gleichung sieht man, daß, so lange x < b ist, $\frac{x}{b}.\pi$ kleiner, als die halbe Peripherie, also y positiv sein wird. Ist x = b, also $\frac{x}{b}$ =

Digitized by Google

1, so ist $\sin \frac{x}{b} \cdot \pi = 0$, also $y = 0$, d. h. der entsprechende Punkt der Wellenlinie liegt im Niveau des ruhenden Wasserspiegels. Ist endlich $x > b$, aber $< 2b$, so ist y negativ, d. h. die Ordinate für das Wellenthal.

§. 573. Die Erscheinungen der Interferenz, Beugung und Zurückwerfung der Wellen werden hier übergangen, da die Gesetze derselben und die Ursachen der Erscheinungen zum Theil noch nicht vollständig erforscht sind.

Fünftes Kapitel.

Aërostatik.

§. 574. Die Aërostatik (die Statik der Luft) lehrt die Gesetze des Gleichgewichts aller expansibeln Flüssigkeiten. Insofern nun die expansibeln Flüssigkeiten, und also auch ihr gewöhnlicher Repräsentant, die Luft, schwer und flüssig sind, müssen sich alle diejenigen statischen Gesetze auf sie anwenden lassen, welche aus Theorie und Erfahrung für tropfbare Flüssigkeiten aufgestellt sind.

§. 575. Aus dem vorhergehenden Paragraphen folgt, daß die Luft, wenn man die Bewegungen derselben nicht berücksichtigt, eine mit dem Niveau des Meeres parallel laufende gekrümmte Oberfläche haben müßte, wobei jedoch nach den Gesetzen der Schwungbewegung eine größere Excentricität unter dem Aequator aus der Arendrehung der Erde folgt. Weil indeß der Luft neben der Schwere und Flüssigkeit auch die Eigenschaft der Expansibilität zukommt, so ist es unmöglich, die Grenze der Luft zu erreichen, und auf diese Weise die Richtigkeit der Sache zu prüfen.

§. 576. Die Luft, als schwere Flüssigkeit, muß gegen alle Körper einen Druck ausüben, welcher dem Gewichte einer Luftsäule von der durch die gedrückte Fläche gegebenen Basis und der Höhe bis an die Grenze der Atmosphäre gleich ist. Die absolute Stärke des Luftdrucks gegen eine gegebene Fläche müßte also nach statischen Gesetzen aus dem specifischen Gewichte der Luft, der Höhe der Säule und dem Inhalte der Fläche bestimmt werden. Allein unter diesen drei bedingenden Größen kann im Allgemeinen nur eine bekannt sein, nämlich der Inhalt der Fläche; von den beiden anderen aber ist die eine, nämlich die Höhe der Luftsäule, bis jetzt noch nicht genau bestimmt, vielleicht überhaupt nicht bestimmbar, die andere aber, nämlich das specifische Gewicht, unterliegt nicht bloß der Correction wegen der Ausdehnung der Luft durch die Wärme, welche bei allen Körpern in Betracht kommt, sondern auch noch einer anderen eigenthümlichen Correction wegen ihrer verschiedenen Dichtigkeit als Folge der Zusammendrückung.

Hiernach läßt sich also der statische Druck der Luft auf dem gewöhnlichen directen Wege nicht ausmitteln, und wir würden denselben gar nicht zu bestimmen vermögen, ließe er sich nicht aus dem gleichen und dabei genau meßbaren Gegendrucke tropfbarer Flüssigkeiten nach dem Gesetze des Standes derselben in communicirenden Röhren entnehmen. Es

Digitized by Google

beruht bekanntlich hierauf das Barometer, das wir schon in §. 30 kennen gelernt haben.

§. 577. Aus §. 574 folgt noch ferner: Jede einzelne Luftmasse muß in der Luft selbst schwimmen, oder, in anderen Worten, der statische Druck der Luft gegen jedes abgesondert gedachte Volumen derselben muß so stark sein, daß sein ganzes Gewicht dadurch aufgehoben wird. Indem aber ein gleicher Druck gegen jeden anderen Körper gleichfalls stattfindet, so wird jeder Körper in der Luft soviel von seinem Gewichte verlieren, als ein gleiches Volumen Luft wiegt, und er wird sonach nicht mit seinem absoluten, sondern mit seinem relativen Gewichte gravitiren.

Eine Hauptanwendung hiervon macht man bei den Luftballons oder Aërostaten. Ist der Cubikinhalt eines Ballons = c Cubikfuß, das Gewicht eines Cubikfußes atmosphärischer Luft = a, so ist das ganze Gewicht der aus der Stelle getriebenen Luft = ac. Wiegt ein Cubikfuß der im Ballon enthaltenen erpansibeln Flüssigkeit b, die Hülle und das, was sonst noch mit dem Ballon verbunden ist, p, so ist das Gesammtgewicht hiervon = bc + p, und man erhält die Gleichung ac — (bc + p) = k, wobei k im Allgemeinen = o, oder positiv, oder negativ sein kann, so daß demnach in Gemäßheit der statischen Gesetze der Ballon entweder schweben bleibt, oder mit seinem relativen Gewichte entweder aufsteigt oder niedersinkt. Daß man aus dieser Gleichung die einzelnen unbekannten Größen finden könne, versteht sich von selbst.

Erfunden sind die Luftballons von den Gebrüdern Montgolfier, Papierfabrikanten zu Anonay, im Jahre 1783. Sie erwärmten und verdünnten dadurch die Luft in ihrem Ballon; daß die Erwärmung während des Steigens des Ballons unterhalten werden mußte, versteht sich von selbst. Nach ihnen nennt man noch jetzt alle Ballons, welche durch erwärmte Luft zum Steigen gebracht werden, Montgolfieren. Noch in dem Jahre der Erfindung kam Professor Charles in Paris auf den Gedanken, das Wasserstoffgas wegen seines äußerst geringen specifischen Gewichtes zur Füllung der Luftballons anzuwenden, weßhalb die mit Wasserstoffgas gefüllten Ballons Charlieren genannt werden. In der neuesten Zeit füllt der Engländer Green seine Ballons mit Kohlenwasserstoffgas, dessen specifisches Gewicht noch gering genug ist, und das dabei den Vortheil der wohlfeileren Darstellbarkeit (Gasfabriken) besitzt. So gefüllte Ballons heißen Greenieren.

Auch beruht auf unserem Paragraphen das Manometer (μανός dünn, μετρεῖν messen). An einer empfindlichen Wage halten sich eine hohle Kugel und ein Gewicht von einem sehr dichten Körper (Blei, Platin) und daher im Verhältniß zur Kugel von sehr kleinem Volumen bei der gewöhnlichen Dichte der Luft das Gleichgewicht. Wenn aber die Dichte der Luft sich ändert, wird das Gleichgewicht aufgehoben, und zwar steigt die Kugel, wenn die Dichtigkeit größer wird, und das Gegengewicht derselben, wenn die Dichtigkeit abnimmt. Wegen des bedeutend größeren Volumens der von der Kugel verdrängten Luft muß im ersten Fall der Gewichtsverlust der Kugel stärker wachsen, als derjenige ihres Gegengewichts, bei der Abnahme der Dichtigkeit ist es aber grade umgekehrt.

§. 578. Bei den luftförmigen Körpern kommt aber außer der leichten

Digitized by Google

Verschiebbarkeit der Theilchen und der Schwere auch noch ihre Zusammendrückbarkeit oder Compressibilität, und das damit in Verbindung stehende Streben nach Vergrößerung des Volumens, d. h. ihre Ausdehnsamkeit oder Expansibilität, in Betracht. Die Größe der Kraft, mit welcher ein an der freien Ausdehnung gehinderter luftförmiger Körper vermöge seiner Ausdehnsamkeit gegen das Hinderniß seiner Ausdehnung (die sperrenden Wände oder die Theile des Gases selbst) drückt, heißt seine Expansivkraft oder seine Spannkraft. Die Spannkraft resultirt daraus, daß die Abstoßung der Molecüle der Gase ein so entschiedenes Uebergewicht über die Anziehung derselben hat, daß letztere im Vergleich zu ersterer ganz verschwindet. Begreiflich wird dieses Uebergewicht durch die verhältnißmäßig große Wärmemenge, welche Gase enthalten.

§. 579. Durch die Erfahrung haben Boyle und nach ihm Mariotte für gasförmige Körper folgendes wichtige Gesetz gefunden: Für den Zustand des Gleichgewichts ist die Elasticität oder die Dichtigkeit der Gase der sie zusammendrückenden Kraft direct, oder es ist das Volumen, welches sie einnehmen, dieser Kraft umgekehrt proportional. Bezeichnen daher E′ und E″ die Expansivkräfte, V′ und V″ die Volumina, D′ und D″ die Dichtigkeiten einer Luftmasse in verschiedenen Zuständen, dann ist für P′ und P″ als zusammendrückende Kräfte 1) $P' : P'' = E' : E''$, 2) $P' : P'' = D' : D''$ und 3) $P' : P'' = V'' : V'$.

Es ist wohl vorauszusehen, daß das Mariotte'sche Gesetz nicht für jeden beliebigen Druck gelten könne, und daß es bei der Verdünnung eines Gases nur bis dahin Anwendung finde, wo die Ausdehnsamkeit desselben mit der Schwere in das Gleichgewicht getreten ist, indem von diesem Punkte an bei einer ferneren Verminderung des Druckes keine weitere Ausdehnung des Gases erfolgen kann. Ferner ist klar, daß es auch bei der Verdichtung eine Grenze geben werde, in deren Nähe die Ausdehnsamkeit eines Gases nicht mehr so rasch wächst, wie der Druck, und daß zuletzt ein Tropfbarwerden eines solchen Körpers eintreten müsse. In der That ist es, wie schon §. 28 bemerkt wurde, gelungen, durch starken Druck viele ausdehnsame Körper, welche man lange Zeit für beständige Gase gehalten hat, in tropfbare Flüssigkeiten zu verwandeln. Die Grenzen, innerhalb welcher das Mariotte'sche Gesetz für verschiedene Gase gilt, sind noch nicht festgestellt, doch haben Arago und Dulong bewiesen, daß es für atmosphärische Luft wenigstens bis zu einem Drucke von 27 Atmosphären noch keine Aenderung erleidet.

Aus dem Mariotte'schen Gesetze folgen auch noch folgende Sätze: 1) Die Expansivkräfte eines Gases verhalten sich umgekehrt wie die Volumina desselben; denn da $P' : P'' = E' : E''$, aber auch $P' : P' = V'' : V'$ ist, so muß auch $E' : E'' = V'' : V'$ sein. 2) Die Expansivkräfte eines Gases sind aber auch den Dichtigkeiten oder den specifischen Gewichten desselben in verschiedenen Zuständen proportional; es war $P' : P'' = E' : E''$ und $P' : P'' = D' : D''$, also ist $E' : E'' = D' : D''$. Bezeichnen nun S′ und S″ die den Dichtigkeiten D′ und D″ entsprechenden specifischen Gewichte, so ist $D' : D'' = S' : S''$, also auch $E' : E'' = S' : S''$.

Bemerkt muß noch werden, daß hier überall gleiche Temperatur vorausgesetzt wird, weil bei ungleichen Temperaturen die Expansivkraft sich ändert, obgleich die Dichtigkeit dieselbe bleibt.

Digitized by Google

Auf das Mariotte'sche Gesetz gründet sich auch ein Instrument, das ebenfalls (vergl. §. 577) den Namen Manometer führt. Es ist dies eine überall gleich weite, heberförmig umgebogene Glasröhre, deren eines Ende zugeschmolzen ist. Sie ist theilweise mit Quecksilber gefüllt, so daß dieses in beiden Schenkeln gleich hoch steht, da sich in dem geschlossenen Schenkel über dem Quecksilber ebenfalls Luft von der gewöhnlichen Dichte befindet. Wird aber auf das Quecksilber in dem offenen Schenkel ein stärkerer Druck ausgeübt, so pflanzt sich dieser gleichmäßig durch das Quecksilber hindurch fort, so daß auch die eingesperrte Luft diesen Druck erleidet. Das Quecksilber steigt in dem geschlossenen Schenkel in die Höhe und verdichtet die Luft. Aus der Größe der Verdichtung kann man dann nach dem Mariotte'schen Gesetz zurückschließen auf die Größe des Druckes. Man gebraucht dieses Manometer unter dem Recipienten der Compressionspumpe um die Größe der Verdichtung zu messen, auch bei Dampfkesseln, um die Stärke der Spannkraft der entwickelten Dämpfe zu prüfen.

§. 580. Vergleicht man die Expansivkraft verschiedener Luftarten mit derjenigen einer einzigen (wofür man gewöhnlich die atmosphärische Luft nimmt, deren Expansivkraft, bei der Dichtigkeit 1, = 1 gesetzt wird), wenn sie mit dieser auf gleiche Temperatur und Dichtigkeit gebracht worden, so heißt sie in Bezug auf jene ihre specifische Expansivkraft.

Die specifische Expansivkraft eines Gases wird gefunden, wenn man die Einheit durch das specifische Gewicht desselben dividirt. Die Dichtigkeit oder das specifische Gewicht des Gases sei = s. Um seine specifische Expansivkraft bestimmen zu können, muß es erst mit der Luft auf gleiche Dichtigkeit gebracht werden, muß es also durch Zusammendrückung oder Ausdehnung die Dichtigkeit = 1 erhalten. Dadurch wird natürlich auch seine Expansivkraft geändert, sie werde zu s'. Nun ist nach §. 579 $s : 1 = 1 : s'$, woraus folgt $s' = \frac{1}{s}$.

§. 581. Nach der Wärmelehre dehnt sich jede ausdehnsame Flüssigkeit der Wärmezunahme proportional aus, und zwar bis zum Siedepunkt des Wassers um 0,375 ihres Volumens bei 0°, folglich für jeden Grad Celsius um 0,00375, und ein Luftvolumen V_0 bei 0° wird bei t°C das Volumen $V_t = (1 + 0{,}00375\,t)\,V_0$ und bei 100° C das Volumen $1{,}375\,V_0$ haben. Weil aber $1 : 1{,}375 = 1000 : 1375$ ist, so könnte man sich den Fundamentalabstand eines Thermometers in 375 gleiche Theile getheilt denken. Setzte man dann beim Gefrierpunkt die Zahl 1000, beim Siedepunkt 1375, so würden diese Grade zugleich das jeder stattfindenden Temperatur entsprechende Luftvolumen ausdrücken. Diejenige Wärmemenge nun, welche bei dem Gefrierpunkte vorhanden ist, verhält sich zu derjenigen, welche den Körper vom Gefrier- bis zu dem Siedepunkt erwärmt, wie 1000 : 375. Wollte man also die Celsius'sche Scale auf diese reduciren, so hätte man die Proportion $1000 : 375 = x : 100$, und $x = 266\frac{2}{3}$. Es wäre also $0°\,C = 266\frac{2}{3}$, $100°\,C = 266\frac{2}{3} + 100 = 366\frac{2}{3}$, $t°\,C = 266\frac{2}{3} + t$ Grade dieser Scale. Ein so eingetheiltes Thermometer heißt ein Luftthermometer, die Grade desselben werden mit L bezeichnet.

§. 582. Nach der Erfahrung verhalten sich die Expansivkräfte einer Luftmasse bei gleichbleibendem Volumen

wie ihre Temperaturen nach dem Luftthermometer, oder es ist, wenn die Expansivkräfte mit E′ und E″, und die entsprechenden Temperaturen mit T′ und T″ bezeichnet werden, $E' : E'' = T' : T''$.

§. 583. Bei gleichbleibender Expansivkraft verhalten sich die Volumina einer Luftmasse wie die Temperaturen nach dem Luftthermometer.

Es sei E′ die Expansivkraft, V′ das Volumen und T′ die Temperatur einer Luftmasse. Man denke sich diese Luft zuerst bei unverändertem Volumen von der Temperatur T′ auf die Temperatur T″ gebracht, so geht nach dem vorhergehenden Paragraphen die Expansivkraft E′ in E″ über, und es ist $E' : E'' = T' : T''$. Nun bleibe die Temperatur unverändert, während die Luft sich soweit ausdehnt, daß sie wieder ihre frühere Expansivkraft E′ annimmt, so ist nach §. 579 $E' : E'' = V'' : V'$. Mit Berücksichtigung beider Proportionen erhält man demnach $E' : E'' = V''T' : V'T''$. Da aber $E' = E''$ sein soll, so muß auch $V''T' = V'T''$ sein, oder $T' : T'' = V' : V''$. Daraus folgt $V'' = \frac{T''}{T'} \times V'$. Ist also V′ das Volumen der Luft beim Gefrierpunkt des Wassers, also bei $266\frac{2}{3}°$ L, so ist ihr Volumen bei T° $= \frac{T}{266\frac{2}{3}} \times V'$.

§. 584. Bei gleicher Temperatur verhalten sich die absoluten Gewichte eines gegebenen Volumens Luft wie ihre Dichtigkeiten oder Barometerstände.

Wenn man also die absoluten Gewichte mit G′ und G″ und die entsprechenden Barometerstände mit B′ und B″ bezeichnet, so ist $G' : G'' = B' : B''$ und daraus $G' = \frac{B'}{B''} \times G''$.

§. 585. Das absolute Gewicht einer gegebenen Luftmasse bei beliebiger Temperatur und beliebigem Barometerstande soll gefunden werden.

Ein Cubikfuß Luft wiegt bei 0° Temperatur und 28 Par. Zoll Barometerstand $2\frac{1}{2}$ Loth. Ist also im vorhergehenden Paragraphen G″ das absolute Gewicht von 1 Cubikfuß Luft bei 0° Temperatur und 28 Zoll Barometerstand, dann ist $G'' = 2\frac{1}{2}$ und $B'' = 28$, also $G' = \frac{B'}{28} \times 2\frac{1}{2} =$ dem Gewichte von 1 Cubikfuß bei dem Barometerstand B′ und der Temperatur 0°. Haben wir aber V Cubikfuß, so wird dieses Gewicht offenbar V mal größer, und es ist dann $G' = \frac{B'}{28} \times V \times 2\frac{1}{2}$. Unsere gegebene Luftmasse ist aber nicht V Cubikfuß bei 0°, sondern es sind V Cubikfuß bei T°. Nach §. 583 finden wir daher, daß wir für V den Werth $\frac{266\frac{2}{3}}{T} \times V$ setzen müssen, und es ist daher endlich $G' = \frac{B}{28} \times \frac{266\frac{2}{3}}{T} \times V \times 2\frac{1}{2}$.

§. 586. In einer ruhigen Luftsäule, deren Temperatur

Digitized by Google

überall dieselbe ist, nehmen die Expansivkräfte von Unten nach Oben in einer geometrischen Progression ab.

Man denke sich die Luftsäule von Unten nach Oben in gleiche Schichten abgetheilt, so sieht man ein, daß zwei über einander liegende Schichten im Zustande des Gleichgewichts nicht gleiche Dichtigkeit haben können, denn die untere Schicht drückt gegen die obere vermöge ihrer Expansivkraft, und die obere gegen die untere vermöge ihrer Expansivkraft und ihres Gewichtes, also muß die Expansivkraft und somit auch die Dichtigkeit der oberen Schicht kleiner sein, als die der unteren. Nun ist der Druck auf die Grundfläche jeder Schicht gleich dem Gewichte der ganzen darüber stehenden Luftsäule. Heißen diese Drücke auf die von Unten nach Oben folgenden Schichten $G_1, G_2, G_3 \ldots . G_{n-1}, G_n$, so sind die Gewichte der Luftmassen in den einzelnen Schichten $G_1 - G_2, G_2 - G_3, \ldots . G_{n-1} - G_n$. Denkt man sich nun die Höhen der einzelnen Schichten so gering, daß sich die Dichtigkeit der Luft in der ganzen Ausdehnung einer Schicht als constant annehmen läßt, so verhalten sich die Gewichte der in den einzelnen Schichten enthaltenen Luft wie die zusammendrückenden Kräfte, d. h. wie die Gewichte der über jeder Schicht stehenden Luftsäule. Es ist also $G_1 - G_2 : G_2 - G_3 = G_2 : G_3$, also $G_1 - G_2 : G_2 = G_2 - G_3 : G_3$, und $G_1 - G_2 + G_2 : G_2 = G_2 - G_3 + G_3 : G_2$ oder $G_1 : G_2 = G_2 : G_3$. Ganz auf dieselbe Weise findet man $G_2 : G_3 = G_3 : G_4$ $G_3 : G_4 = G_4 : G_5$ u. s. w., also auch überhaupt $G_1 : G = G_{n-1} : G_n$, woraus $G_n = \frac{G_2}{G_1} \times G_{n-1}$ folgt. Setzt man $\frac{G_2}{G_1} = q$ und für n nach und nach 1, 2, 3, 4 u. s. w., so erhält man aus der letzten Gleichung $G_1 = q . G_0$, $G_2 = q . G_1 = q^2 . G_0$, $G_3 = q . G_2 = q^3 . G_0$, $G_4 = q . G_3 = q^4 . G_0$, u. s. w., $G_n = q^n . G_0$. Die einzelnen Drücke auf die auf einander folgenden Schichten bilden also eine geometrische Progression, deren Exponent q oder $\frac{G_2}{G_1}$ und deren erstes Glied G_0 d. h. der Druck auf die unterste Fläche der untersten Schicht ist. Die Gewichte $G_1, G_2, G_3 \ldots .$ der verschiedenen Luftsäulen verhalten sich aber wie die durch sie erzeugten Dichtigkeiten, und diese wieder wie die Expansivkräfte der Luft in den einzelnen Schichten, also ist ebenso $E_1 : E_2 = E_2 : E_3$, $E_2 : E_3 = E_3 : E_4 \ldots .$, also $E_1 : E_2 = E_{n-1} : E_n$ und $E_1 = q . E_0$, $E_2 = q^2 . E_0$, $E_3 = q^3 . E_0$ u. s. w. Aber ebenso könnte man auch dieselbe Progression hinsichtlich der Barometerstände setzen, nämlich $B_1 : B_2 = B_2 : B_3 = B_3 : B_4 = B_{n-1} : B_n$. Also ist auch hier wieder $B_n = q^n . B_0$.

§. 587. Auf den vorhergehenden Paragraphen gründet sich die Theorie des barometrischen Höhenmessers (Hypsometrie, ὕψος Höhe und μετρεῖν messen). Es seien nämlich m und n die Stellenzeiger zweier verschiedenen Luftschichten, und $m > n$, dann ist $B_m = q^m . B_0$ und $B_n . = q^n . B_0$, folglich durch Division beider Gleichungen $\frac{B_m}{B_n} = q^{m-n}$, oder in Logarithmen

$\log. B_m - \log. B_n = (m - n) \log. q$ oder $m - n = \frac{1}{\log. q} (\log. B_m - \log. B_n)$. Bezeichnen wir die Höhe einer einzelnen Schicht mit h, und multipliciren die letzte Gleichung mit h, dann ist $mh - nh = \frac{h}{\log. q} (\log. B_m - \log. B_n)$. $mh - nh$ ist nun aber der Höhenunter-

Digitized by Google

ſchied beider hier betrachteten Schichten; nennen wir dieſen H, dann iſt $H = \frac{h}{\log. q} (\log. B_m - \log. B_n)$. Es hängt nun Alles davon ab, den conſtanten Faktor $\frac{h}{\log. q}$ zu finden. Bei einem Barometerſtand von 760 Millimeter oder 336,9 Pariſer Linien und bei einer Temperatur von 0° iſt die atmoſphäriſche Luft 10467 mal leichter, als Queckſilber (die Luft 770 mal leichter, als Waſſer, und Waſſer 13,598 mal leichter, als Queckſilber). Wenn wir in dieſer Luft nun 1 Fuß ſteigen, ſo wird folglich die Queckſilberſäule im Barometer ſich um den 10467ten Theil eines Fußes oder um 0,01376 Linien verkürzen, das Barometer alſo von 336,9 auf 336,88624 Linien fallen, oder es wird, um die Schichten noch niedriger, und dadurch das Reſultat noch genauer zu bekommen, wenn man das Barometer um 0,10467 Fuß höher ſtellt, der Queckſilberſtand um 0,00001 Fuß oder 0,00144 Par. Linien abnehmen, er wird alſo in einer Höhe von 0,10467 Par. Fuß gleich 336,9 — 0,00144 = 336,89856 Par. Linien ſein. q war aber $\frac{B_2}{B_1} = \frac{B_1}{B_0}$, alſo iſt es = $\frac{336,89856}{336,9}$, wenn h = 0,10467 Fuß iſt, folglich iſt $\frac{h}{\log. q}$ = $\frac{0,10467}{\log. 336,89856 - \log. 336,9} = -\frac{0,10467}{\log. 336,9 - \log. 336,89856}$. Da nun log. 336,9 = 2,5275010110 und log. 336,89856 = 2,5274991547 iſt, ſo iſt log. 336,9 — log. 336,89856 = log. q = 0,0000018563 und $\frac{0,10467}{\log. 336,9 - \log. 336,89856} = \frac{0,10467}{0,0000018563} = 56386$. Wir haben alſo, wenn die Höhe nach Pariſer Fußen gemeſſen wird, $H = -56386 (\log. B_m - \log. B_n) = 56386 (\log. B_n - \log. B_m)$, wo B_n den Barometerſtand des tiefer gelegenen Ortes bedeutet.

§. 588. Will man jedoch mittelſt der im vorhergehenden §. gefundenen Formel genaue Reſultate erhalten, ſo ſind noch verſchiedene Correkturen anzubringen.

1) Correktion wegen der Queckſilbertemperatur.

Die Wärme dehnt das Queckſilber aus, die Kälte zieht es zuſammen. Beträgt der Barometerſtand bei der Nulltemperatur 28 Zoll, ſo wird er bei höherer Temperatur mehr, bei niederer aber weniger betragen, wenn auch der Luftdruck ungeändert geblieben iſt; wir werden daher die Erhebung eines Ortes bei Wärmegraden wegen des höheren Barometerſtandes für niedriger, ſowie bei Kältegraden wegen des niederen Barometerſtandes für höher ſchätzen, als ſie wirklich iſt. Dadurch wird es nothwendig, die abgeleſene Barometerhöhe auf die Normaltemperatur, den Nullpunkt der Thermometerſcale, zu reduciren, da unſere Formel nur unter der Vorausſetzung dieſer Temperatur gefunden worden iſt. Dieſer Reduction liegt der Erfahrungsſatz zu Grunde, daß jede Queckſilberſäule ſich um $\frac{1}{4440}$ ihrer Länge für jeden Grad R. oder um $\frac{1}{5550}$ für jeden Grad C. ändert, d. h. für jeden Grad mehr

Digitized by Google

Wärme verlängert, dagegen für jeden Grad weniger Wärme um denselben Theil verkürzt. Für eine beobachtete Barometerhöhe B und die Quecksilbertemperatur T°C. ist demnach die corrigirte Barometerhöhe $= B \mp \frac{T}{5550} \times B = B\left(1 \mp \frac{T}{5550}\right) = B(1 \mp 0{,}00018 \ldots T)$ oder für T°R. $= B(1 \mp 0{,}000225225 \ldots T)$, und zwar $\mp$, je nachdem T Wärme- oder Kältegrade angibt. Der Ausdehnung des Quecksilbers durch die Wärme wirkt die Ausdehnung des Materials der Scale entgegen, welche bei ganz genauen Bestimmungen auch in Rechnung zu bringen ist, besonders wenn die Scale aus Metall, weniger, wenn sie aus Glas ist.

§. 589. 2) Correktion wegen der Lufttemperatur.

Bei zunehmender Wärme wird die Luft ausgedehnt, dadurch dünner, also auch specifisch leichter, bei abnehmender dagegen zieht sie sich zusammen, wird dichter, also specifisch schwerer. Wenn also bei der Nulltemperatur eine Erhebung um a Fuß das Barometer um 1 Linie fallen läßt, so wird bei dieser Erhebung das Barometer bei Wärmegraden weniger, bei Kältegraden dagegen mehr, als eine Linie fallen, oder, was dasselbe ist, man wird sich bei Wärmegraden wegen der leichteren Luft mehr, bei Kältegraden wegen der schwereren Luft weniger, als bei der Nulltemperatur erheben müssen, damit das Barometer immer um eine Linie falle. Es bedarf mithin die berechnete Höhe, wenn die Lufttemperatur nicht Null ist, jedes Mal eine Correktion; sie ist bei Wärmegraden zu klein, bei Kältegraden zu groß. Diese Correktion beruht auf der Erfahrung, daß die Ausdehnung der Luftsäule für jeden Reaumür'schen Grad $= \frac{1}{213\frac{1}{3}}$ (§. 581), oder für jeden Centesimalgrad $= \frac{1}{266\frac{2}{3}}$ ihrer Länge beträgt, mithin um so viel für jeden Wärmegrad die berechnete Höhe zu vergrößern, und für jeden Kältegrad zu verkleinern ist. In der Erfahrung findet zwar keine gleichförmige Erwärmung der Luft in verticaler Richtung statt, doch kann man die Sache so betrachten, als ob die Temperatur nach Oben hin in einer arithmetischen Reihe abnähme, wenn die Höhen in einer solchen wachsen. Man kann demnach als Temperatur der ganzen Luftsäule, deren Wärme von Unten nach Oben abnimmt, das arithmetische Mittel zwischen den Temperaturen an der unteren und oberen Beobachtungsstation setzen. Heißt die uncorrigirte Höhe H, so ist, wenn die untere Temperatur T und die obere t ist, die corrigirte Höhe $= H \pm \frac{T+t}{2} \times \frac{1}{213\frac{1}{3}} H = H\left(1 \pm \frac{T+t}{426{,}6}\right)$.

§. 590. 3) Correktion wegen der Schwere.

Bisher haben wir angenommen, daß überall eine gleich große Schwerkraft auf die Atmosphäre wirke. Dieses findet jedoch nicht statt, sondern die Schwerkraft nimmt ab sowohl in verticaler Richtung von Unten nach Oben, als auch in horizontaler Richtung von den Polen nach dem Aequator. Die nothwendige Folge davon ist, daß dieselbe Quecksilbermasse an Orten, an

Digitized by Google

welchen die Schwerkraft größer ist, einen größeren Druck ausübt, als an denjenigen Orten, an welchen die Schwerkraft geringer ist, oder, was dasselbe ist, es wird eine niedrigere Quecksilbersäule da, wo die Schwere größer ist, dasselbe leisten, als eine höhere da, wo die Schwere kleiner ist. Wir haben also nach dem Gesagten noch zwei Correktionen in der berechneten Höhe vorzunehmen.

a) Es seien X und Y zwei Punkte in derselben Verticalen liegend, X sei von dem Mittelpunkte der Erde um r entfernt, und die Höhe XY sei $=$ h, so daß Y von dem Mittelpunkte der Erde um $r + h$ entfernt ist. Nennen wir g die Intensität der Schwerkraft in X, so wird in Y die Intensität der Schwerkraft g' kleiner sein, und zwar müssen g und g' im umgekehrten Verhältniß des Quadrates der Entfernung der Punkte X und Y von dem Mittelpunkte der Erde stehen, so daß $g : g' = (r + h)^2 : r^2$; es ist also $g = \frac{(r+h)^2}{r^2} g' = \frac{r^2 + 2rh + h^2}{r^2} g' = \left(1 + \frac{2h}{r} + \frac{h^2}{r^2}\right) g'$. Es ist aber immer $\frac{h}{r}$ so klein, daß wir das Quadrat dieses Werthes vernachlässigen können, so daß $g = \left(1 + \frac{2h}{r}\right) g'$ ist. Auf das Quecksilber des Barometers in Y wirkt also eine minder intensive Schwerkraft, dafür ist aber auch die Luft an dieser Stelle minder schwer. Diese beiden Umstände gleichen also gewissermaßen einander aus. Eine Verbesserung, welche wir aber wirklich anzubringen haben, ergibt sich aus der Betrachtung, daß die Differenz $B_y - B_x$ der beiden Barometerstände, welche die Luftsäule XY aufwog, durch eine incompressible Flüssigkeit angedeutet wurde, während die Luftsäule eine elastische Flüssigkeit ist. Nun haben wir aber bisher angenommen, in der ganzen Länge der Luftsäule wirke eine unveränderte Schwerkraft g, in der That wirkt aber in jedem Punkte derselben eine andere Schwerkraft. Es wird sich jedoch die Sache ungefähr auf die nämliche Weise verhalten, wenn wir annehmen, in der ganzen Länge der Luftsäule wirke eine Schwerkraft gleich dem arithmetischen Mittel der Schwerkräfte an ihren Endpunkten, also $= \frac{g + g'}{2} = \frac{\left(1 + \frac{2h}{r}\right) g' + g'}{2}$ $= \left(1 + \frac{h}{r}\right) g' = \left(1 + \frac{h}{r}\right) \frac{r^2 g}{(r+h)^2} = \frac{(r^2 + rh)\, g}{r^2 + 2rh + h^2}$, und, wenn wir Dividend und Divisor durch $r^2 + rh$ dividiren, $= \frac{g}{1 + \frac{h}{r}}$. In dem nämlichen Verhältniß aber, in welchem diese Luftsäule leichter wird, verlängert sie sich auch, um dieselbe Differenz $B_y - B_x$ der beiden Barometerstände aufzuwiegen; wir haben also die berechnete Höhe h zu vermehren in dem Verhältniß $1 : 1 + \frac{h}{r}$, und die berichtigte Höhe ist demnach $h \left(1 + \frac{h}{r}\right)$.

Da der Halbmesser der Erde über 19 Millionen Pariser Fuß groß ist, so wird also bei Höhen, welche größer, als 19000 Fuß sind, diese Ver-

Digitized by Google

besserung erst den tausendsten Theil der ganzen Höhe betragen. Bei kleineren Höhen ist sie natürlich verhältnißmäßig kleiner.

§. 591. b) Correktion wegen der geographischen Breite.

Wenn wir die Intensität der Schwerkraft unter 45° der Breite g setzen, so ist dieselbe an einem anderen, auf der nämlichen horizontalen Fläche gelegenen Punkte, dessen geographische Breite β ist, $= g\,(1 - 0{,}002837 \times \cos.\ 2\beta)$, welchen Werth wir g' nennen wollen. Cos. 2β wird negativ, wenn $\beta > 45°$, positiv, wenn $\beta < 45°$ ist. Wenn wir also annehmen, unsere Formel sei richtig für eine Breite von 45°, so müssen wir für eine andere Breite β eine Correktion anbringen, und die berechnete Höhe in demselben Verhältniß vermindern oder vermehren, in welchem g' größer oder kleiner als g ist, weil bei einer geringeren Schwerkraft wieder eine höhere Luftsäule nöthig ist, um die nämliche Differenz der beiden Barometerstände aufzuwiegen. Die corrigirte Höhe ist also $= H \times \frac{g}{g'}$. Nun war $g' = g \times (1 - 0{,}002837.\cos.\ 2\beta)$, folglich ist, wenn man auf beiden Seiten durch $g' \times (1 - 0{,}002837.\cos.\ 2\beta)$ dividirt, $\frac{1}{1 - 0{,}002837.\cos.\ 2\beta} = \frac{g}{g'}$, also $H \times \frac{g}{g'} = \frac{H}{1 - 0{,}002837.\cos.\ 2\beta}$. Wird Zähler und Nenner dieses Quotienten mit $1 + 0{,}002837.\cos.\ 2\beta$ multiplicirt, so erhält man als corrigirte Höhe $\frac{(1 + 0{,}002837.\cos.\ 2\beta)\,H}{1 - 0{,}002837^2\,(\cos.\ 2\beta)^2}$. Das Glied im Nenner $0{,}002837^2 \times (\cos.\ 2\beta)^2$ kann aber als ein sehr Kleines von der zweiten Ordnung weggelassen werden; dadurch wird der Nenner zu 1, und die corrigirte Höhe ist dann $= H\,(1 + 0{,}002837\,.\cos.\ 2\beta)$. Für den Aequator ist $\beta = 0$, also cos. $2\beta = 1$, folglich die corrigirte Höhe $= 1{,}002837$ H. Die Correktion wird also ungefähr schon $\frac{1}{350}$ der berechneten Höhe betragen.

§. 592. Es sollte eigentlich auch noch eine Correktion wegen der Feuchtigkeit der Luft eingeführt werden, allein die Bestimmungen für dieselbe haben noch nicht den Grad von Sicherheit erlangt, welchen die übrigen Correktionen besitzen.

§. 593. Um das specifische Gewicht eines Gases zu finden, verfährt man folgendermaßen. Man nimmt einen Ballon, der wenigstens 250 bis 300 Cubikzoll faßt, mit einem Hahne luftdicht verschlossen und an eine gute Luftpumpe angeschraubt werden kann. Nachdem man die Luft in demselben so stark als möglich verdünnt hat, schließt man den Hahn, bringt den Ballon an eine empfindliche Wage, bemerkt sein Gewicht $= P$, öffnet hierauf den Hahn, und bestimmt sein Gewicht $= P'$ von Neuem. Setzt man voraus, daß durch die Luftpumpe ein ganz luftleerer Raum erzeugt wurde, so ist $P' - P$ das Gewicht der im Ballon enthaltenen Luft. Kennt man das Volumen V des Ballons, so ist $\frac{P' - P}{V}$ das specifische Gewicht der atmosphärischen Luft. Auf diese Weise überzeugte man sich, daß 1 Cubikfuß atmosphärischer Luft bei 0° C. und 28 Zoll Barometerstand $2\frac{1}{4}$ Loth wiegt. Läßt man in den Ballon

Digitized by Google

so, wie er nach der Verdünnung der Luft an der Wage hängt, und das Gewicht P hat, statt atmosphärische Luft irgend ein anderes Gas eindringen, und findet jetzt dessen Gewicht = Q, so ist $\frac{Q-P}{V}$ das specifische Gewicht des Gases, welches sich in dem Ballon befindet.

Handelt es sich bloß um Vergleichung der Dichte d eines Gases mit jener der atmosphärischen Luft unter gleichen Umständen, in welchem Falle man der Einfachheit wegen die Dichte der atmosphärischen Luft als Einheit annimmt, so ist man der schwierigen Volumsbestimmung des Ballons überhoben, denn das Verhältniß der Gewichte $P' - P$ und $Q - P$ der Luft und des Gases ist auch jenes ihrer Dichten, so daß man $d : 1 = Q - P : P' - P$ und also $d = \frac{Q-P}{P'-P}$ hat.

§. 594. Alle diese Versuche setzen voraus, daß die Luftarten ganz rein seien, daß ihre Dichte und die Capacität des Ballons, sowie sein Gewicht in der Luft ungeändert bleiben, und daß mittelst der Luftpumpe ein völlig luftleerer Raum erzeugt werden könne, lauter Dinge, welche in der Wirklichkeit nicht stattfinden; denn die Luftarten enthalten immer eine größere oder geringere Menge von Wasserdünsten, welche auf ihr specifisches Gewicht einen nicht unbedeutenden Einfluß haben, dieses ändert sich mit dem Drucke der äußeren Luft und mit ihrer Temperatur, letztere hat sogar auf die Capacität des Gefäßes und auf sein Gewicht in der Luft einen Einfluß, welcher zwar sehr gering ist, und daher manchmal übersehen werden kann, bei sehr genauen Versuchen aber doch in Anschlag gebracht werden muß. Aus diesen Gründen wählt man zu Versuchen dieser Art nur solche Luft, welche vorher gut ausgetrocknet wurde, und arbeitet nur bei einer bestimmten Temperatur und bei einem bestimmten Luftdruck, oder reducirt die unter anderen Umständen erhaltenen Resultate auf die Normaltemperatur und den Normaldruck. Ist nämlich S das specifische Gewicht, welches man bei der Temperatur t und unter dem Luftdruck B gefunden hat, s das specifische Gewicht auf die Normaltemperatur 0°C. und den Normaldruck b reducirt, ferner V das Volumen einer bestimmten Gasmasse bei der Temperatur t und dem Drucke B, hingegen V' dasselbe unter dem Normaldrucke und bei der Normaltemperatur, so ist nach §. 579 $S : s = V' : V$, also $s = \frac{SV}{V'}$, und $V : V' = b : B$, also $V' = \frac{B}{b} \times V$ (unter Voraussetzung gleicher Temperatur), aber nach §. 583 wegen der ungleichen Temperatur $V' = \frac{266\frac{2}{3}}{t} \times V$ bei gleichem Drucke, folglich wegen ungleicher Temperatur und ungleichem Drucke $V' = \frac{B}{b} \times \frac{266\frac{2}{3}}{t} \times V$. Es war aber $s = \frac{SV}{V'}$, also ist $s = \frac{SV}{\frac{B}{b} \times \frac{266\frac{2}{3}}{t} \times V} = S \times \frac{b}{B} \times \frac{t}{266\frac{2}{3}}$.

§. 595. Man kann die Dichte eines Gases auch unmittelbar aus seiner chemischen Zusammensetzung berechnen, wenn die Dichten der Be-

Digitized by Google

ſtandtheile, und das Verhältniß, in welchem ſie ſich zu dem gegebenen Gaſe verbinden, ſowie die etwa bei der Verbindung eintretende Volumveränderung gegeben ſind. Geſetzt, es beſtehe ein Gas aus a Raumtheilen eines Stoffes, deſſen Dichte = d iſt, und aus a′ Raumtheilen eines ſolchen, deſſen Dichte d′ heißt, mithin im Ganzen aus a + a′ Raumtheilen. Nun iſt ad die Maſſe des einen, a′d′ die Maſſe des anderen Beſtandtheiles, ad + a′d′ die Maſſe des Ganzen und $\frac{ad + a'd'}{a + a'}$ die Maſſe des letzteren für das Volumen 1, alſo die Dichte des zuſammengeſetzten Gaſes, im Falle bei der Verbindung der beiden Beſtandtheile keine Ausdehnung oder Zuſammenziehung erfolgt iſt. Findet aber das Eine oder das Andere ſtatt, ſo ändert ſich dadurch dieſe Dichte des Gaſes. Geſetzt, es ſei bei der chemiſchen Verbindung der Beſtandtheile das Volumen a + a′ in A übergegangen, ſo iſt, wenn man die Dichte des Gaſes mit D bezeichnet, $D = \frac{ad + a'd'}{A}$.

§. 596. Zwei Gaſe, welche durch eine bewegliche, aber undurchdringliche Scheidewand, z. B. durch eine Waſſer-, Oel- oder Queckſilberſäule getrennt ſind, ſtehen im Gleichgewicht, wenn ſie mit gleichen und entgegengeſetzten Kräften unmittelbar auf die Scheidewand, und daher mittelbar auf einander ſelbſt wirken. Es muß demnach jede Veränderung in der Ausdehnſamkeit des einen Gaſes eine ähnliche im anderen hervorbringen.

§. 597. Man denke ſich in einen beſtimmten Raum V zwei verſchiedene Gaſe gebracht, von welchen das eine die Spannkraft P, das andere die Spannkraft Q zeigen würde, wenn jedes für ſich allein bei der beſtehenden Temperatur beſagten Raum erfüllte. Wenn dieſe Gaſe ſich im Volumen V mit einander vermengen, ohne jedoch chemiſch auf einander einzuwirken, ſo wird aus ihrem Zuſammenſein eine gewiſſe Spannung hervorgehen, welche wir gegenwärtig unterſuchen wollen. Wären die Gaſe in dem Raume V durch eine bewegliche Scheidewand getrennt, ſo würde zum Gleichgewicht erfordert, daß dieſe von beiden Seiten denſelben Druck erlitte. Heißt die dieſem Drucke entſprechende Spannkraft S, welche zugleich die in der Geſammtmaſſe herrſchende iſt, und ſind V′ und V″ die Volumina, welche die Gaſe hierbei einnehmen, ſo hat man nach dem Mariotte'ſchen Geſetz P : S = V′ : V, und ebenſo Q : S = V″ : V; daraus folgt P : Q = V′ : V″, alſo auch P : P + Q = V′ : V′ + V″. Nun iſt V′ + V″ = V, daher P : P + Q = V′ : V. Es war aber auch P : S = V′ : V, folglich iſt P + Q = S. *In dieſem Falle kommt alſo die Spannkraft, mit welcher beide Gaſe das gegebene Volumen einnehmen, der Summe der Spannkräfte gleich, mit welchen ſie, einzeln betrachtet, dieſes Volumen ausfüllen würden.*

§. 598. Offenbar iſt dieſe Betrachtung auf den Fall nicht anwendbar, wenn ſich beide Gaſe mit einander gleichförmig mengen, wie Stickſtoff und Sauerſtoff bei der atmoſphäriſchen Luft; allein die Erfahrung lehrt, *daß auch die Spannkraft eines Gasgemenges der Summe der auf denſelben Raum ſich beziehenden Spannkräfte Gemengtheile gleich iſt.* Man ſieht hieraus, daß in einem Gemenge zweier einander nicht chemiſch afficirenden Gaſe jedes den Raum,

Digitized by Google

wie mit derselben Dichte, ebenso auch mit derselben Spannkraft behauptet, welche es zeigen würde, wenn das andere Gas gar nicht vorhanden wäre.

§. 599. Die Richtigkeit dieser Sätze wird noch durch die Erfahrung auf das Augenscheinlichste bestätigt, welche bereits in §. 33 angeführt war, nämlich daß zwei heterogene Gase, z. B. Kohlensäure und Wasserstoffgas, welche sich nicht chemisch mit einander verbinden, und bei gleichen Spannkräften in zwei über einander stehenden, bloß durch eine Oeffnung mit einander in Communication gesetzten Gefäßen enthalten sind, so zwar, daß die specifisch schwerere den unteren, die leichtere den oberen Raum einnimmt, nicht im Gleichgewichte bleiben, sondern von jedem so viel in den Raum des anderen eindringt, als nöthig ist, um eine völlig gleichförmige Mengung darzustellen. Hieraus erklärt es sich nun auch, daß, wenn in einem mit der äußeren Luft in Verbindung stehenden Raume durch Athmen oder Verbrennen Sauerstoff verzehrt ist, gleichsam nur das Gleichgewicht des Sauerstoffs in genanntem Raume mit dem Sauerstoffe in der Atmosphäre gestört wird, und daß aus letzterer, um den Verlust zu ersetzen, Sauerstoff in ersteren eindringt.

§. 600. Bei zwei heterogenen, mit einander durch sehr enge Oeffnungen in Berührung befindlichen Gasen erscheint jedoch das Bestreben jedes derselben, in den Raum des anderen einzudringen, d. h. sich zu diffundiren, nicht gleich. Ist nämlich die Scheidewand, welche zwei Gase von einander trennt, für dieselben durchdringlich, wie z. B. thierische Blasen, Holz, gebrannter, aber nicht glasirter Thon, gebrannter in Wasser abgerührter und hierauf getrockneter Gyps u. s. w., so dringen von jedem Gase Volumina durch die Wand, welche sich nach Graham umgekehrt wie die Quadratwurzeln der Dichte der Gase verhalten, vorausgesetzt, daß die Gase nicht chemisch auf einander wirken, und ihr Druck zu beiden Seiten der Scheidewand während des ganzen Verlaufs gleich groß erhalten wird. Nachdem von jedem der Gase ein diesem Gesetze entsprechender Theil durch die Scheidewand gegangen ist, herrscht Gleichgewicht.

Mit der hier betrachteten Diffusion ist die Durchführung gewisser Gase, welche von Wasser begierig absorbirt werden, durch feuchte Membranen nicht zu verwechseln. Gibt man z. B. eine nasse mit atmosphärischer Luft zum Theil gefüllte und zugebundene Blase in eine Atmosphäre von Kohlensäure, so schwillt sie in Folge des Uebergangs von Kohlensäure in dieselbe binnen 12 bis 24 Stunden bis zum Bersten auf, während nur sehr wenige atmosphärische Luft aus derselben entweicht. Hier wird das Gas von dem Wasser verschluckt, und geht mit diesem durch die Blase.

Sechstes Kapitel.

Aërodynamik oder Pneumatik.

§. 601. Es ist außerordentlich schwer, die Gesetze der Bewegung elastisch flüssiger Körper mit der erforderlichen Schärfe aufzufinden, weil sich die hierbei zu berücksichtigenden Bedingungen der Elasticität und der Dichtigkeit fortdauernd ändern, und die Räume, in welche sich die Ströme derselben ergießen, in der Regel durch allmählige Anfüllung den herbei-

Digitized by Google

fließenden Massen keine freie Aufnahme gestatten, der mannichfaltigen Hindernisse nicht zu erwähnen, welche aus der Adhäsion an benachbarte Körper oder Schichten von Gasarten, vielleicht auch durch die eigene wellenartige Bewegung im Innern dieser Ströme hervorgehen. Bisher hat daher die Analyse noch nicht vermocht, allen Bedingungen genügende Formeln für die Bewegungsgesetze der Gasarten aufzufinden, und muß daher manche Probleme ganz ungelöst lassen, oder sich mit Näherungswerthen begnügen.

§. 602. Für die Ausflußgeschwindigkeit der Gase gelten dieselben Gesetze, wie bei den tropfbaren Flüssigkeiten, d. h. die Ausflußgeschwindigkeit ist $c = \sqrt{2gs}$ (§. 545), wenn s die Druckhöhe bezeichnet. Hieraus folgt zunächst die Beantwortung der Frage, mit welcher Geschwindigkeit die Luft in den leeren Raum einströmt. Für tropfbare Flüssigkeiten bezeichnet, wie gesagt, s die Höhe der Flüssigkeitssäule, deren Druck den Ausfluß bewirkt, und welche von derselben Natur und Dichte ist, wie die ausströmende Flüssigkeit. Gase aber, welche in einem Gefäße enthalten sind, sind nie durch eine Säule von gleichmäßiger Dichte und wohlbegrenzter Höhe comprimirt. Es kann also hier s nicht direct aus der Beobachtung genommen werden. Die wirkliche Luftsäule kann jedoch auf eine eingebildete von überall gleichmäßiger Dichtigkeit reducirt werden, wenn man berücksichtigt, daß die erstere einer Quecksilbersäule von gegebener Länge das Gleichgewicht hält. Nehmen wir also die mittlere Höhe der Quecksilbersäule im Barometer im Näherungswerthe zu 28 Par. Zoll $= 2\frac{1}{3}$ Par. Fuß an, und das specifische Gewicht jenes Metalls gegen Luft $= 10467$ (§. 587), so würde hiernach die Höhe der Luftsäule $10467 \times 2\frac{1}{3}$ oder 24423 Fuß betragen. Diese Größe wäre demnach in unserem Falle der numerische Werth von s, und da man g genau genug zu 30 Par. Fuß annehmen kann, so ist demnach die Geschwindigkeit der in den leeren Raum einströmenden Luft $c = \sqrt{2 \times 30 \times 24423} = 1210$ Par. Fuß in einer Secunde.

§. 603. Wenn die Luft aus einem Reservoir, in welchem sie nur durch den Druck einer halben Atmosphäre comprimirt ist, in einen leeren Raum ausströmt, so wird die Ausflußgeschwindigkeit grade so groß sein, wie in dem vorigen Falle, nämlich 1210 Fuß. Der Grund davon ist leicht einzusehen, denn obgleich hier der Ausfluß nur durch einen halb so großen Druck hervorgebracht wird, wie vorher, so ist auch die ausfließende Luft nur halb so dicht. *Ueberhaupt ist die Geschwindigkeit, mit welcher die Luft in einen leeren Raum einströmt, stets dieselbe, der Druck, welcher das Einströmen bedingt, mag sein, welcher er will.*

§. 604. Es gibt nur wenige Fälle, in welchen man annehmen darf, daß Luft in ein absolutes Vacuum frei einströmt; desto häufiger aber sind diejenigen Erscheinungen, bei welchen die anzufüllenden Räume mehr oder minder verdünnte Gasarten enthalten, zuweilen von so geringer Dichtigkeit, daß der von ihnen verursachte Widerstand füglich ganz vernachlässigt werden kann. Wenn man aber berücksichtigt, daß auch die flüssigen Körper, so lange sie sich im widerstandleeren Raume bewegen, gegen jedes ihnen entgegenstehende Hinderniß als hart anstoßen müssen, wie sich dieses deutlich beim Anschlagen des Quecksilbers an die obere Wandung der Toricelli'schen Röhre und beim Wasserhammer zeigt, so erklärt sich hieraus leicht der heftige Schall, das eigentliche Platzen, welches die in fast leere Räume einströmende Luft hervorbringt. Ver-

Digitized by Google

ſchloſſene Büchſen, deren Deckel ſchnell geöffnet wird; electriſche Piſtolen; Knall der abgebrannten Geſchütze; Klatſchen der Peitſche.

§. 605. In §. 602 haben wir den Werth von s dadurch gefunden, daß wir den Barometerſtand, d. h. den Druck, unter welchem die Luft ſtand, mit der Zahl multiplicirten, welche anzeigt, wie vielmal das Queckſilber dichter, als die Luft, iſt. Nennen wir alſo den Druck b, die Dichte des Queckſilbers D, die der Luft d, ſo kann $s = \frac{bD}{d}$ geſetzt werden. Hat man nun ſtatt der atmoſphäriſchen Luft ein anderes Gas, welches ebenfalls unter dem Drucke einer Atmoſphäre ſteht, ſo bleibt b unverändert, aber d ändert ſich, und folglich auch c. Wird d zu d', ſo werde c zu c'; dann iſt $c : c' = \sqrt{2g\frac{bD}{d}} : \sqrt{2g\frac{bD}{d'}} = \sqrt{\frac{1}{d}} : \sqrt{\frac{1}{d'}} = \sqrt{\frac{d'}{dd'}} : \sqrt{\frac{d}{dd'}} = \frac{\sqrt{d'}}{\sqrt{dd'}} : \frac{\sqrt{d}}{\sqrt{dd'}}$ $= \sqrt{d'} : \sqrt{d}$, d. h. *bei zwei Gaſen, welche unter demſelben Druck ſtehen, verhalten ſich die Geſchwindigkeiten, mit welchen ſie in den leeren Raum einſtrömen, umgekehrt wie die Quadratwurzeln aus ihren Dichtigkeiten.* Das leichtere Gas ſtrömt alſo ſchneller aus.

§. 606. Weit zahlreicher, als die Erſcheinungen des Einſtrömens der Luft in abſolut leere Räume ſind diejenigen, bei welchen Luftmaſſen von größerer Dichtigkeit in Räume fließen, welche mit Luft von geringerer Dichtigkeit erfüllt ſind. Hier iſt das Beſtreben zu entweichen begreiflicher Weiſe nur von der Differenz beider Spannungen abhängig. Bezeichnen wir daher den Unterſchied beider Spannungen als eine Luftſäule von der Höhe H und der Dichtigkeit der ſtärker comprimirten Luft, ſo iſt die Ausflußgeſchwindigkeit $c = \sqrt{2gH}$. Wir wollen verſuchen, den Werth von H für den Fall zu beſtimmen, daß aus einem Reſervoir ſtärker comprimirte Luft in die atmoſphäriſche Luft ausſtrömt. Die Compreſſion der Luft im Reſervoir ſei durch eine Waſſerſäule gemeſſen, deren Höhe wir mit h bezeichnen wollen. Dieſe Höhe h gibt den Unterſchied der Spannung der inneren und der äußeren Luft an, und es iſt nur auszumitteln, wie hoch eine Luftſäule von der Dichtigkeit der Luft im Reſervoir ſein müßte, um einer Waſſerſäule von der Höhe h das Gleichgewicht zu halten. Hätten wir mit Luft von mittlerer atmoſphäriſcher Preſſung zu thun, ſo könnte man für die Waſſerſäule von der Höhe h eine Luftſäule von der Höhe 770 h ſubſtituiren. Um derſelben Waſſerſäule das Gleichgewicht zu halten, haben wir aber eine Luftſäule von geringerer Höhe nöthig, wenn die Luft dichter iſt, und zwar ſteht die erforderliche Höhe im umgekehrten Verhältniß zur Dichtigkeit der Luft. Die atmoſphäriſche Luft von mittlerer Preſſung, welche 770 mal leichter iſt, als Waſſer, iſt gleichſam durch eine Waſſerſäule von 32 Fuß, welche Höhe mit b bezeichnet ſein mag, comprimirt, während die Luft in unſerem Reſervoir den Druck einer Waſſerſäule $b' + h$ auszuhalten hat, wenn b' die Höhe einer Waſſerſäule bezeichnet, welche dem grade ſtattfindenden Barometerſtande entſpricht. Die Dichtigkeit der Luft von mittlerer Preſſung verhält ſich demnach zu der Dichtigkeit der Luft in unſerem Reſervoir, wie $b : b' + h$; die Luft im Reſervoir iſt alſo $\frac{b' + h}{b}$ mal dichter, als die Luft von

Digitized by Google

mittlerer atmosphärischer Pressung; statt einer Luftsäule von der Höhe 770h dieser dünneren Luft haben wir also auch eine Säule von der Höhe $\frac{770hb}{b'+h}$ jener dichteren Luft zu setzen, und dieser Werth ist es, welchen wir für H in die obige Gleichung setzen müssen. Die Ausflußgeschwindigkeit für unseren Fall ist also $c = \sqrt{2g \cdot \frac{770hb}{b'+h}}$.

§. 607. Die Ausflußmenge in einer Secunde würde man erhalten, wenn man den Querschnitt f der Oeffnung mit diesem Werthe von c multiplicirt, vorausgesetzt, daß die ausströmenden Lufttheilchen durch jeden Punkt des Querschnitts mit derselben eben gefundenen Geschwindigkeit passiren. Die Ausflußmenge in t Secunden würde demnach sein $M = ft \times \sqrt{2g \frac{770hb}{b'+h}}$.

§. 608. Wenn man die Resultate der Berechnung mit den Ergebnissen directer Versuche vergleicht, wie sie Schmidt, d'Aubuisson und Andere angestellt haben, so findet man, daß jene eine viel größere Geschwindigkeit geben, als diese. Man muß also hier die theoretische Ausflußmenge mit einem bestimmten Factor μ multipliciren, um die wirkliche zu erhalten. Nach Schmidt beträgt die wirkliche Geschwindigkeit nur 0,52 von der berechneten, wenn die Ausflußöffnung an einer dünnen Wand angebracht ist, wächst aber auf 0,6, wenn man die dünne Platte mit einer etwa einen Zoll langen cylindrischen Röhre vertauscht. Eine conische Röhre gibt eine noch größere Geschwindigkeit, die größte eine solche, deren äußere Durchmesser sich wie 1 : 2 verhalten, und deren Länge den Durchmesser 5 bis 10 mal übertrifft. Die Ursache dieser Differenz zwischen der berechneten und der durch Versuche gefundenen Geschwindigkeit liegt ohne Zweifel in einer Zusammenziehung des Luftstrahls, welche derjenigen des Wasserstrahls ähnlich ist.

§. 609. Noch viel unvollständiger und weniger festgestellt sind die Untersuchungen über das, was die Bewegung der Gase in Röhrenleitungen betrifft. Außerdem sind diese Untersuchungen fast alle mit Hilfe der höheren Mathematik angestellt, so daß sie hier übergangen werden müssen. Im Allgemeinen stimmt diese Bewegung der Gase mit derjenigen des Wassers in Röhrenleitungen überein. Die gefundenen Resultate sind folgende. Die Mengen aller der verschiedenen ausströmenden Gase sind den nämlichen Gesetzen unterworfen. Die Mengen zweier verschiedener Gase verhalten sich unter übrigens ganz gleichen Bedingnngen wie die Quadratwurzeln aus ihren Dichtigkeiten. Die Gasmengen, welche Röhrenleitungen liefern, stehen im graden Verhältniß mit dem Drucke, welchen sie im Gasbehälter erleiden, und im umgekehrten Verhältniß mit der Quadratwurzel der Länge der Leitungsröhren. Der Widerstand, welchen sie in Röhrenleitungen erleiden, ist dem Quadrate ihrer mittleren Geschwindigkeit proportionirt.

§. 610. Nur beim Ausfluß aus capillaren Oeffnungen zeigen Gase besondere Eigenthümlichkeiten. Nach Faraday's Versuchen strömt bei hohem Druck ein bestimmtes Volumen Wasserstoffgas schneller aus, als ölbil-

Digitized by Google

dendes Gas, bei niederem Drucke aber findet das Gegentheil statt, wenn der Ausfluß durch enge Röhren, diese mögen von Glas oder Metall sein, geschieht. Bei dem Ausfluß aus feinen, an Papier, Platinblechen u. s. w. gemachten Ritzen und Löchern findet diese Verschiedenheit nicht statt, sie zeigt sich aber desto mehr, je langsamer die Gase ausströmen. Dieses scheint nicht bloß von der Verschiedenheit der Dichte der Gase abzuhängen, sondern von irgend einer anderen mechanischen Eigenschaft derselben.

§. 611. Der Druck, welchen bewegte Luft gegen ein Hinderniß ausübt, ist im Allgemeinen wie jener des Wassers zu beurtheilen. Man darf aber dabei nicht vergessen, daß man es mit einer ausdehnsamen Flüssigkeit zu thun habe, welche bei dem Anstoßen verdichtet wird, und sich hierauf wieder ausdehnt, und sowohl in diesem, als in jenem Falle, gleich einem elastischen Körper auf den gestoßenen Körper wirkt. Indeß ist man hierin noch nicht weder auf dem Wege der Rechnung, noch auf dem der Erfahrung, völlig in's Reine gekommen, und letztere lehrt oft ein Verhalten bei dem Stoße der Luft, welches man aus unseren theoretischen Untersuchungen nicht abzuleiten im Stande ist. Hierhin gehört folgende, von Quetelet beobachtete Erscheinung. Wenn man nach ihm einen Luftstrom senkrecht oder in schiefer Richtung gegen eine ebene Fläche bläst, so prallt derselbe nicht in dem Einfallswinkel zurück, sondern gleitet vielmehr an der Ebene hin, wie sich an einer Lichtflamme oder dem Rauche einer Räucherkerze zeigt, welche man in den Strom bringt. Die Spitze der Lichtflamme wird nämlich in der Nähe des gegen die Ebene gerichteten Luftstroms gegen den Punkt gebogen, auf welchen man bläst, in einiger Entfernung stellt sie sich senkrecht gegen die Ebene, in noch größerer aber biegt sie sich nach entgegengesetzter Richtung, und wird endlich ihr fast parallel. Die strömende Luft scheint der Ebene zu adhäriren, und eine Schicht zu bilden, welche Anfangs dünner ist, weiterhin aber dicker wird.

§. 612. Wenn verdichtete Luft aus einer Oeffnung ausströmt, und einen gegenüberstehenden Körper, z. B. eine leicht bewegliche Platte, trifft, so sollte man wohl erwarten, daß diese von dem Luftstrome fortgestoßen würde. Dieses ist auch wirklich der Fall, wenn der Ausfluß aus einer frei stehenden Röhre erfolgt. Ist aber an der Röhre nächst der Ausflußöffnung eine Platte angesteckt, welcher eine leichte Platte in geringer Entfernung gegenübersteht, beide von einem Durchmesser, welcher denjenigen der Oeffnung weit übertrifft, so wird diese Platte gegen die Oeffnung hingetrieben. Nur bei größerer Entfernung der Platten geschieht das Gegentheil, und die bewegliche Platte folgt dem aus der Röhre hervortretenden Luftstrome. Diese Erscheinung, welche man das aërodynamische Paradoron nennen kann, hat folgenden Grund. Es fließt durch die ringförmige Oeffnung mehr Luft ab, als durch die enge Oeffnung an der Wand des Gefäßes vermöge des inneren Luftdrucks nachfolgen kann, und es würde ein luftleerer Raum zwischen der Wandöffnung und der Platte entstehen, wenn die äußere Luft nicht die letztere gegen die erstere triebe, und den ringförmigen Raum verminderte.

Digitized by Google

Alphabetisches Register.

Seite

Aberration der Linsen 238
Aberration der sphärischen Spiegel . 220
Absorption 24
Acceleration 463
Accomodation des Auges 255
Accord 182
Achromat 268
Achromatische Prismen und Linsen . 251
Adhäsion 20, 21, 43
Adhäsionsplatten 20
Aeoline 167
Aeolipile 356
Aeolsharfe 161
Aequatorealstrom 414
Aërodynamik 547
Aërodynamisches Paradoron . . . 551
Aërostat 536
Aërostatik 535
Aggregatzustände 14
Aggregatzustand, Aenderung des durch Wärme 341
Agonische Linie 55
Akustik 157
Ampère's Gestell 116
Ampère's Theorie des Magnetismus 127
Anode 102
Anion 102
Ansatzröhrchen, Einfluß derselben auf die Ausflußmenge 522
Aplanatische Linsen 252
Aräometer, verschiedene Arten derselben 509
Archimedisches Princip 505
Archimedische Schraube 459
Argand'sche Lampe 408
Astatische Nadel 57
Athermane Körper 396
Atmosphäre 34
Atmosphärendruck 35
Atmosphärische Erscheinungen, durch die Wärme bedingt 411
Atomistische Theorie 7, 9
Atwood'sche Fallmaschine 466
Auflösung 23
Auftrieb des Wassers 504
Auge 252
Augenmaß 259
Ausdehnbarkeit 9
Ausdehnsamkeit 28
Ausdehnung 3

Seite

Ausdehnung, lineare, cubische . . . 334
Ausdehnung der Krystalle durch die Wärme 335
Ausdehnung des Wassers durch die Wärme 338
Ausdehnung durch die Wärme 327, Ausdehnung der festen Körper 333, tropfbar flüssiger Körper 336, ausdehnsam flüssiger Körper . . . 339
Ausdehnungscoëfficient 334
Ausflußgeschwindigkeit 518
Ausflußmenge, theoretische 521
Ausladen gewöhnlicher, 77, allgemeiner 77

Barlow's Rad 115
Barometer 36
Barometer, Variationen des . . . 39
Barometerprobe 38
Beaumé's Aräometer 511
Beharrungsvermögen 7
Beleuchtung, abhängig von der Intensität des Lichtes, 208, von der Entfernung von der Lichtquelle 208, von der Lage gegen die Lichtquelle 209
Bergkrystallplatten, links drehende . 318
Bergkrystallplatten, rechts drehende . 318
Beugungserscheinungen durch eine Oeffnung 281, durch mehrere Oeffnungen 285, durch Gitter . . 287
Beweglichkeit 7
Bewegung, absolute, relative 460, gradlinige veränderliche 462, gleichförmig und ungleichförmig beschleunigte, gleichförmig und ungleichförmig verzögerte 462
Bewegung, gleichförmige, beschleunigte, verzögerte 428
Bewegung, Größe der 429
Bewegung, krummlinige 476
Bilder, positive, negative 245
Blitz 148
Blitzableiter 150
Blitzkette 74
Blitzröhren 149
Blitztafel 74
Bolognefer Leuchtstein 205
Boussole 55
Bramah'sche Presse 500
Brechung durch sphärische Concavlinsen 239

Digitized by Google

Seite

Brechung durch sphärische Converlinsen 234
Bufolt'scher Farbenkreisel 246

Calorimetrie 373
camera lucida 228
camera obscura 237
Canalwage 507
Capillarität 25
Capillaritätsphänomene 512
Centralbewegung 481
Centrifugalkraft 486
Centripetalkraft 481
Chemisches Feuerzeug 405
Chemische Harmonica 171
Chladni'sche Figuren 168
Chromatische Abweichung . . . 250
Circularpolarisation 318
Circularpolarisation durch Flüssigkeiten hervorgebracht 319
Cirrus 421
Coërcitivkraft 50
Cohäsion 14, 21
Collectivglas 266
Combinationstöne 201
Communicationsgefäße 502
Comunicationsrohr 192
Commutator 141
Compaß 55
Compensationspendel . . 335, 494
Compensationsstreifen 333
Componenten 429
Compressionspumpe 31
Compressionswärme 410
Condensator 81
Condenstren, das 352
Conisches Rad 451
Contractionscoëfficient 521
Contacttheorie 109
Coulomb'sche Drehwage 71
Cumulus 421

Dalton'sches Gesetz 415
Dämpfe 33
Dampfcylinder 357
Dampfelectrifirmaschine 69
Dampfheizung 353
Dampfkessel, Gefahren für den . . 362
Dampfkessel 359, Vorrichtungen an demselben 360
Dampfmaschine 357
Dampfmaschine, atmosphärische . . 357
Dampfmaschinen, Leistung der nach Pferdekräften 368
Dampfmaschinen mit und ohne Condensation, mit und ohne Expansion 358
Daniell's Hygrometer 417
Davy's Sicherheitslampe 358
Declination, magnetische 54
Destillation 353
Diakaustische Linie 238
Diamagnetische Körper . . 46, 53, 128

Seite

Diaphragma 265
Diathermane Körper 396
Diathermanität 395
Diathermansie 397
Dichtigkeit 6
Differentialthermometer 332
Diffusion der Gase 43
Dioptrik 223
Diploscop 261
Donner 151
Dove's Drehungsgesetz 415
Dreiflang 182
Drilling 451
Druckpumpen 40
Dualistisches System 63
Dunstbläschen 420
Dur-Tonleiter 183
Dynamik 460
Dynamometer 17

Ebbe 12
Echo 193
Eigenschaften, allgemeine 3, besondere 14
Eiscalorimeter von Lavoisier und Laplace 379
Elasticität 26, 28, 30
Elasticitätsoberfläche 304
Electricität, atmosphärische . . . 147
Electricität, atmosphärische, Ursachen derselben 153
Electricität 60, positive und negative 62
Electricität, statische 70, dynamische. 70
Electricität, Geschwindigkeit der . . 83
Electricität, Halbleiter der 64
Electricität, Leiter und Nichtleiter der 63
Electricität, Verbreitungsweise der . 82
Electricität, chemische Wirkungen der 74, 91, 94, 100
Electricität, magnetische Wirkungen der 75, 110
Electricität, mechanische Wirkungen der 72, 91
Electricität, physicalische Wirkungen der 73, 74, 98
Electricität, physiologische Wirkungen der 74, 97
Electricitätserregung durch Berührung eines festen und eines flüssigen Körpers 90
Electricitätserregung durch Druck 154, durch Spaltung 154, durch den Lebensproceß 155
Electricitätserregung durch Mittheilung 61
Electricitätserregung durch Vertheilung 65
Electrische Atmosphäre 66
Electrische Batterie 77
Electrische Differenz 89
Electrische Fische 155

Digitized by Google

Seite

Electrischer Funken, Dauer des Lichts eines 84
Electrisches Pendel 63
Electrische Pistole, Kanone . . . 74
Electrisches Residuum 76
Electrische Sichel oder Flugrad . . 72
Electrische Spannung 69
Electrische Spannungsreihe . . . 88
Electrischer Strom 70, 92
Electrische Ströme, Erregung durch Magnete 135
Electrische Ströme, gegenseitige Einwirkung der, auf einander . . . 124
Electrische Telegraphe 121
Electrische Uhren 123
Electrische Zündmaschinen 80
Electrisirmaschine 67
Electrochemie 105
Electroden 102
Electrodynamischer Cylinder . . . 117
Electrolyse 102, Electrolyt . . . 102
Electrolytisches Gesetz 105
Electromagnete 118
Electromagnetismus 111
Electromagnetismus, Anwendungen desselben 119
Elektromotoren 87, 90
Electromotorische Kraft 87
Electrophor 79
Electroscop 63, Bennet'sches 63, Bohnenberger-Bennet'sches 100
Elongationswinkel 487
Emanationstheorie des Lichts . . . 273
Emissionstheorie des Lichtes . . . 273
Endosmose 27
Endgeschwindigkeit 428
Erdmagnetismus 54, 60
Erdmagnetismus, durch thermoëlectrische Ströme hervorgerufen . . 144
Erdwärme 404
Ergänzungsfarben 248
Erhaltung der Flächen 482
Erscheinungen gekreuzter Gypsblättchen zwischen gekreuzten Spiegeln 311
Erscheinungen senkrecht zur optischen Axe geschliffener Bergkrystallplatten im Polarisationsapparat . . . 318
Erstarren, das, ... 344
Expansivkraft 353
Expansivkraft, specifische 538
Extraordinärer Strahl 300
Extrastrom 135

Fahrenheit'sche Scale, Bestimmung des Nullpunkts derselben . . . 343
Fall, freier, der Körper 465
Farben, complementäre 248
Farben doppelt brechender Krystallplatten im polarisirten Lichte 307, dünner Gypsblättchen 307
Farben dünner Blättchen 288
Farben, natürliche der Körper . . 249
Farben, physiologische 262
Farben, subjective 261
Farbenbild, prismatisches 241
Farbige Ringe in einaxigen Krystallen 312, in zweiaxigen Krystallen . . 315
Farbenringe senkrecht zur Axe geschliffener Quarzplatten 325
Farbenspectrum 241
Farbenzerstreuung 240
Fernrohr, astronomisches oder Keppler'sches 270, terrestrisches 271, dialytisches 271
Fernrohr, dioptrisches, katoptrisches 268, holländisches oder Galilei'sches 269
Festigkeit 17
Feuchtigkeit, absolute 416
Feuchtigkeit, relative 416
Feuchtigkeitsgehalt der Luft . . . 415
Feuerlöschende Mittel 408
Feuerspritzen 41
Fischbeinhygrometer von Deluc . . 417
Flageolet-Töne 164
Flamme 408
Flaschenzug, Potenzflaschenzug, gemeiner Flaschenzug 454
Flötenwerke 170
Flüssigkeit 20, 28
Flüstergallerien 195
Fluth 12
Franklin'sche Tafel 75
Fraunhofer'sche Linien 250
Fresnel's Spiegelversuch 279
Friktion 495

Galvanische Batterie 96, Wirkungen derselben 97
Galvanische Electricität 86
Galvanische Kette 90, veränderliche 93, constante 93
Galvanische Vergoldung, Versilberung u. s. w. 104
Galvanisirtes Eisen 94
Galvanismus, chemische Theorie des 109
Galvanographie 103
Galvanokaustik 104
Galvanometer 111
Galvanoplastik 102
Gase 33
Gase, permanente 33
Gefäßbarometer 37
Gegenstrom 135
Gehörorgan 203
Geschwindigkeit 428
Geschwindigkeit, relative 460
Gesichtswinkel 258
Getriebe 451
Gewicht, absolutes 10, specifisches . 10
Gewitter, electrische Natur desselben . 147

Digitized by Google

Seite

Giftheber 42
Göpel 450
Grammengewicht 11
Graupeln 424
Gravitation 12
Gravitationsgesetz 438
Grundeis 339
Guckkasten 238

Haarröhrchen 25
Haarhygrometer von Sauſſure . . 417
Hagel 424
Hagel, Hypothesen über die Entſtehung des 425
Hahnluftpumpen 30
Hare's Deflagrator oder Verbrenner 98
Haspel 450
Hebel, verſchiedene Arten deſſelben . 446
Heber 41
Heber, anatomiſcher 503
Heber, unterbrochener 43
Heberbarometer 37
Heliostat 215
Heliotrop 215
Heronsball 32
Heronsbrunnen 32
Hinderniſſe der Bewegung 494
Hochdruckmaſchinen 358, 369
Höhenmeſſung, barometriſche . . . 540
Honigthau 427
Hornhaspel 450
Hornrad 450
Hörrohr 197
Hydraulik oder Hydrodynamik . . 517
Hydrauliſche Preſſe 500
Hydrauliſcher Widder 527
Hydrodynamiſcher Druck 517
Hydroëlectriſirmaſchine 68
Hydroſtatik 497
Hydroſtatiſcher Druck 502
Hygrometer 417
Hygroſcopiſche Subſtanzen . . . 416
Hyperboliſche Curven in Kryſtallplatten, welche parallel mit der Axe geſchliffen ſind 316
Hypotheſe 2
Hypſometrie 540

Imponderabilien 11
Inclination, magnetiſche 57
Indifferenzpunkt 46
Inductionselectricität 132
Inductor 141
Intenſität, magnetiſche 59
Intenſitäts-Inductor 141
Interferenzprisma 279
Interferenzſpiegel 279
Intervall 181
Jonen 102
Irradiation 259

Seite

Iſochimenen 404
Iſodynamiſche Linien 59
Iſogoniſche Linien 55
Iſoklinifche Linien 58
Iſolatoren 65
Iſolirſchämel 72
Iſotheren 404
Iſothermen 404
Iſotherme Fläche 386

Kaleidophon 165
Kaleidoſcop 217
Kalkſpathprismen 299
Kalotypes Papier 246
Kältemiſchungen 343
Kammrad 451
Katakauſtiſche Linie 221
Kathode 102
Kation 102
Katoptrik 212
Katoptriſche Anamorphoſen . . . 223
Keil 456
Keppler'ſche Geſetze 482
Klangfiguren 168
Klima 404
Knallgasmikroſcop 267
Knotenlinien 167
Kraft, beſtändige oder abſolute, relative oder veränderliche . . . 462
Kraft, momentane, continuirliche . . 427
Kreuzhaspel 450
Kronrad 451
Krücke 170
Kryſtalle, negative 302
Kryſtalle, poſitive 302
Kryſtallform des Kalkſpaths . . 298
Kryſtalliſation 18
Kryſtallſyſteme 19
Kurzſichtigkeit 257

Labialpfeifen 170
Ladungsſäulen 108
Landwinde 411
Lane's Flaſche 78
Laufrad 451
Lebendige Kraft 475
Leicht- und ſtrengflüſſige Körper . . 342
Leidenfroſt'ſches Phänomen . . . 349
Leitungswiderſtand 128; ſpecifiſcher . 131
Leslie'ſcher Würfel 392
Leydner Flaſche 76
Libelle 506
Licht, Beugung des 278
Licht, Brechung des durch Körper mit parallelen Flächen 230, durch Körper mit geneigten Flächen . . . 231
Licht, doppelte Brechung des . . . 297
Licht, Diffraction des 278
Licht, Geſchwindigkeit des 210
Licht, Geſetze des reflectirten . . . 213
Licht, homogenes 242

Digitized by Google

	Seite
Licht, Inflexion des	278
Licht, Interferenz des	279
Licht, zerstreutes	212
Lichtenberg'sche Figuren	73
Lichtsauger	205
Linsen	233
Locomotive	370
Luftballon	536
Luftheizung	388
Luftpumpe	29
Luftspiegelung	229
Luftthermometer	538
Lupen	263
Magdeburger Halbkugeln	35
Magnet	45
Magnete, Armatur natürlicher	52
Magnet, Einwirkung eines festen auf einen beweglichen Strom	115
Magnet, künstlicher	45
Magnete, Methoden künstliche anzufertigen	51
Magnet, natürlicher	45
Magnete, Rotationen von unter dem Einfluß des galvanischen Stromes	114
Magnetischer Aequator	58
Magnetische Curven	50
Magnetische Kraft, Methode die zu messen	59
Magnetische Magazine	52
Magnetischer Meridian	55
Magnetisches Pendel	46
Magnetische Polarität	47
Magnetische Pole der Erde	55
Magnetisirung durch den electrischen Strom	118
Magnetisirung durch Vertheilung	49
Magnetismus	45
Magnetnadel	47
Magnetnadel Perturbationen der	56
Magnetnadel, Variationen der	56
Magneto-electrische Rotationsmaschinen	140
Magneto-electrische Ströme	136
Magnetpole	46
Manometer	536, 538
Mariotte's Gesetz	537
Maschine, einfache, zusammengesetzte	446
Masse	6
Materie	3
Maximum- und Minimumthermometer	331
Mechanik	427
Mechanische Potenzen	446
Medicinalgewicht	11
Mehlthau	427
Metacentrum	506
Metallthermometer	331
Metermaß	4
Metronom	494
Mikroscop, einfaches 263, zusammengesetztes	265
Mischung	24
Mittel, die Luft in schwingende Bewegung zu versetzen	170
Mittellinie	305
Mittelpunkt der parallelen Kräfte	436
Molecularkräfte	10
Molecüle	7
Moll-Tonleiter	183
Moment einer Kraft	437
Mondlicht	404
Monochord	163
Moussons	413
Multiplicator	111
Muskel- und Nervenstrom	156
Nachhall	193
Naturgesetz	2
Naturkraft	2
Nebel	420
Nebenstrom, Wirkungen desselben	134
Nebenstrom	85
Neeff'scher Apparat	138
Neeff's Blitzrad	97
Newton'sche Farbenringe	288
Nicholson's Aräometer	509
Nicol'sche Prismen	305
Niederdruckmaschinen	358
Nimbus	421
Niveau	502
Nobili'sche Farbenringe	102
Nordlicht	152
Ohm'sches Gesetz	130
Ohr des Dyonisius	196
Ombrometer	422
Opernglucker	270
Ozon	74
Optisches Auge	256
Optische Axe	300
Optische Axen, ungleiche Lage der, für verschiedenfarbige Strahlen	316
Optische Kammer	206
Optische Täuschungen	258
Ordinärer Strahl	300
Oersted's Fundamentalversuch	110
Ort, absoluter, relativer	460
Panoramen	238
Papin's Topf	349
Parallelogramm der Kräfte	431
Parallelspiegel	216
Passatwinde	412
Pendel, mathematisches und physisches	486
Pendeluhren	493
Percussionsmaschine	475
Perpetuum mobile, electrisches	100
Phantasmagorien	268
Photographie	244
Photographisches Papier	246
Photometer	209
Physik	1

Digitized by Google

	Seite
Piezometer	9
Pneumatik	547
Pneumatisches Feuerzeug	410
Polarisation durch doppelte Brechung	302
Polarisation, galvanische	107
Polarisation des Lichtes 292, durch Reflexion 293, durch einfache Brechung 294, durch Turmalinplatten 294, durch unregelmäßige Reflexion	295
Polarisationsebene	295
Polarisationsebene, Drehung der, durch Einwirkung des Magnetismus	325
Polarisationswinkel	293
Polaroscop Savart's	317
Polarstrom	414
Porosität	5
Pouillet's Pyrometer	379
Prisma	232
Psychrometer von August	418
Pulshammer	346
Pumpen	39
Pyknometer	509
Pyroëlectrische Krystalle	146
Pyrometer	332
Pyrophore	406
Quadrantenelectrometer	70
Quantitäts-Inductor	141
Quecksilbercompensation	336
Quecksilberregen	36
Quellen, periodisch fließende	42
Räderwerk	451
Real's Extractpresse	503
Reflectoren	268
Reflexion, totale	227
Reflexionsgoniometer	215
Refractoren	268
Regen	421
Regenmesser	422
Region der Calmen	412
Reibung	495
Reibungscoëfficient	495
Reibungselectricität	60
Reif	426
Resonanz	201
Resultirende Kraft	429
Reversionspendel	492
Rheostat	129
Richmann'sche Regel	376
Röhrenwiderstand	529
Rohrwerke	170
Rolle, feste, bewegliche	452
Rollenzug	453
Rose'sches Metallgemisch	343
Rostpendel	336
Rotationsmagnetismus	141
Rückschlag	151
Rumford's Calorimeter	406

	Seite
Saughéber	42
Saugpumpen	40
Schädlicher Raum	30
Schall, Fortpflanzung des,	185
Schall, Geschwindigkeit des,	188
Schall, Interferenz des,	197
Schall, Reflexion des,	193
Schall, Stärke des,	191
Schallstrahl	186
Schallwelle 172, Vordertheil, Hintertheil derselben 172, Länge derselben	173
Schallwellen, Reflexion der,	173
Schatten, Kernschatten, Halbschatten Schlagschatten	207
Schiefe Ebene	455
Schiefe Ebene, Bewegung über die,	468
Schiffsdampfmaschine	368
Schlagende Wetter	385
Schlagweite	70
Schmelzen, das	341
Schnarrwerke	170
Schnee	423
Schnellwage	447
Schraube	457
Schraube ohne Ende	459
Schwaden	419
Schwere	10, 33
Schwere, relative	468
Schwerpunkt	440
Schwimmen	505
Schwindmaß	345
Schwingungen, Einfluß der Länge der Saiten auf dieselben 160, Einfluß der Spannung, der Dicke und der Dichte	161
Schwingungen der Saiten in aliquoten Theilen	162
Schwingungen, stehende und fortschreitende	171
Schwingungen, tönende, fester Körper 158; gespannter Saiten 158, elastischer Stäbe 164, gespannter Membranen 166, ebener Scheiben 167, gekrümmter Scheiben	168
Schwingungen, tönende, der Luft	169
Schwingungsbäuche	176
Schwingungsknoten	163
Schwingungszahlen für verschiedenfarbiges Licht	285
Schwungkraft	486
Seegesicht	229
Seewinde	411
Segner's Wasserrad	504
Sehweite	256
Sehen, das,	253
Seiltrad	450
Seitenkräfte	429
Selbstleuchtende Körper	205
Senguerd'scher Hahn	29
Senkwage	509

Digitized by Google

Seite

Sieden, das 346
Sirenen 178
Solarlicht 99
Solenoïd 117
Sonnenmikroscop 267
Sonnenwärme 402
Spannkraft 353
Specifisches Gewicht, Bestimmungen desselben bei festen und tropfbaren Körpern 508
Specifisches Gewicht, Bestimmung desselben für Gase 544
Spiegel 212
Spiegel, Erscheinungen der ebenen 214, der sphärischen Hohlspiegel 217, der sphärischen Conversspiegel 221, der cylindrischen und conischen Spiegel 223
Spiegelmikroscope 266
Spiegeltelescope 271
Spillrad 450
Sprachgewölbe 195
Sprachrohr 196
Spritzflaschen 32
Staar, grauer und schwarzer . . . 254
Statik 429
Statisches Verhältniß 445
Stechheber 43
St. Elmsfeuer 152
Steifheit der Seile 497
Stereoscop 255
Sternrohr 271
Stethoscop 188
Stimmgabeln 166
Stimmorgan des Menschen . . . 171
Stirnrad 451
Stoß der Körper, grader und schiefer, centraler und excentrischer 471, unelastischer Körper 471, elastischer Körper 472
Stoßheber 527
Strahlenbrechung, astronomische und terrestrische 226
Strahlende Wärme, Geschwindigkeit der 391
Strahlende Wärme, gradlinige Fortpflanzung der 390
Strahlende Wärme, wovon die wärmende Wirkung derselben abhängig ist 391
Stratus 421
Stroboscopische Scheiben 260
Südlicht 153

Taktmesser 494
Tangentenbouffole 113
Tangentialkraft 481
Tantalusbecher 42
Taschenperspectiv 269
Taucherglocke 5
Temperatur 326

Seite

Temperatur, gleichschwebende, ungleichschwebende 184, 200
Temperatur, mittlere eines Tages, Monats, Jahres, eines Ortes . . . 403
Thau 426
Thaumatrop 260
Theilbarkeit 6
Thermochrose 397
Thermoëlectricität 143
Thermoëlectrische Säule 146
Thermoëlectrischer Strom, Wirkungen des 146
Thermometer 328
Töne, durch stehende Schwingungen erzeugt 180
Tonhöhe, absolute, relative . . . 181
Tonleiter, diatonische 180, chromatische 183, enharmonische . . . 184
Toricelli'sche Leere 35
Toricelli'sches Theorem 519
Toricelli'scher Versuch 34
Torsionswagen 17
Traghebel 446
Trägheit 7
Tretscheibe 451
Trevelyan'sches Instrument . . . 180
Tribometer oder Reibungsmesser . . 495
Tropfbarkeit 20
Tubus 268
Turmalin, electrische Erscheinungen desselben 145

Uhren galvanisch registrireude . . 124
Undurchdringlichkeit 4
Unitarisches System 63
Unterstützungspunkt 445

Vacuum, Toricelli'sches 35
Ventil 30
Ventilluftpumpen 30
Vera'sche Seilmaschine 23
Verbrennung 406
Verdunsten, das 350
Verriebecher 42
Vibrationsebene 295
Vibrationstheorie des Lichtes . . 273
Volta's Fundamentalversuch . . . 87
Volta's Säule 95
Voltameter 107
Volumen 3

Wage 447
Wage, hydrostatische 508
Wärme 326
Wärme, Fortpflanzung der 383, verschiedene Arten derselben . . . 383
Wärme, Gleichgewicht der . . . 385
Wärme, Hypothesen über das Wesen der 389
Wärmestrahlen, Interferenz der . . 400

Digitized by Google

Seite

Wärme, latente oder gebundene . . 343
Wärme, Maßeinheit für die . . . 372
Wärme, Quellen der 402
Wärme, relative 377
Wärme, specifische 377
Wärme, Aenderungen der specifischen 382
Wärme specifische, Gesetz von Dulong und Petit 381
Wärme, specifische, Methoden die der Körper zu bestimmen 377, Mischungsmethode 377, Methode des Eisschmelzens 379, Abkühlungsmethode 380, Abänderung der Mischungsmethode, um die specifische Wärme der Gase zu bestimmen . 381
Wärme, thierische 409
Wärmeabsorptionsvermögen . . . 392
Wärmeausstrahlungsvermögen . . 391
Wärmecapacität 375
Wärmeerzeugung durch chemische Processe 405
Wärmeerzeugung durch Reibung . 411
Wärmeleiter, gute, schlechte . . . 384
Wärmeleitung 384, durch feste Körper 384, durch krystallisirte Körper 386, durch tropfbar flüssige und luftförmige Körper 387, Gesetze derselben 389
Wärmequantität, welche beim Schmelzen gebunden wird 373, welche beim Sieden gebunden wird 374
Wärme, Wirkung derselben auf ausdehnsame Flüssigkeiten 353, auf Gase 353, auf den Wasserdampf 354, auf andere Dämpfe . . . 356
Wärmeschatten 391
Wärmestrahlen, Beugung der . . . 400
Wärmestrahlen, Brechung der . . 399
Wärmestrahlen, doppelte Brechung der 401
Wärmestrahlen, Polarisation der . 400

Seite

Wärmestrahlen, Reflexion der . . 394
Wärmestrahlung 389
Wärmestrahlen, Zerstreuung der . . 395
Wasserspiegel 502
Wasserwage 506
Watt'sche Dampfmaschinen, einfach und doppelt wirkende 358
Weitsichtigkeit 257
Wellenbewegung der tropfbaren Flüssigkeiten 531
Wellenlänge des Lichtes, Bestimmung derselben 284
Wellenlinie 534
Wellenoberfläche der Lichtstrahlen . 300
Wellenrinne 532
Wellrad 449
Wetterglas 38
Wetterleuchten 149
Widerstand des Mittels 496
Wind 411
Winddüchse 32
Winde 450
Windrose 55
Winkelhebel 446
Winkelspiegel 216
Wippe Poggendorff's 108
Wolken 420
Wurfbewegung 477
Wurfhebel 446

Zamboni'sche Säulen (trockne) . . 99
Zauberlaterne 268
Zerlegung der Kräfte 434
Zündmaschinen 410
Zunge, auffchlagende, durchschlagende 170
Zungenpfeifen 170
Zusammendrückbarkeit . . . 9, 28, 30
Zusammensetzung der Kräfte . . . 429
Zusammenziehung des Strahls . . 521
Zuschlag 343

Digitized by Google

Berichtigungen und Druckfehler.

Seite 11 Zeile 20 von Oben soll 5760 statt 5960 stehen.
„ 27 „ 13 „ Unten lies $\mathfrak{D}\omega$ $\mathfrak{D}\omega$.
„ 53 „ 5 „ „ setze §. 268 statt §. 270.
„ 53 „ 9 „ „ „ §. 264 „ §. 266.
„ 84 fehlt in Fig. 12 da, wo AB und A'B' sich schneiden, C.
„ 182 Zeile 6 von Unten setze $\frac{1}{3}$ statt $\frac{1}{4}$.
„ 240 „ 1 „ „ „ §. 170 statt §. 172.
„ 270 fehlen in Fig. 59 die Buchstaben, in den Mittelpunkt der Converlinse setze a, in den der Concavlinse a''', den kleineren Pfeil bezeichne mit b'c', den größeren mit b''c'', so daß b' und b'' an die Spitzen zu stehen kommen, von den äußersten Strahlen vor der Converlinse bezeichne den oberen mit ba, den unteren mit ca, und den Punkt, in welchem die durch a und a'' gehende grade Linie den kleineren Pfeil trifft, mit a'.
„ 341 Zeile 8 von Oben ist nach „Wärme" das Wort „sie" zu tilgen.
„ 457 muß in Fig. 127 P an dem Punkte stehen, wo PO die AB durchschneidet.

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google